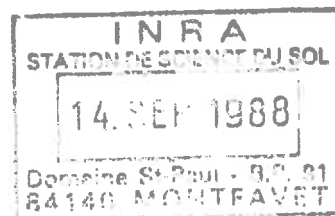


T44-12-34
G E 5



E.N.I.T.A. DIJON QUETIGNY

**FISSURATION DE MATERIAUX
TERREUX AU COURS DE
L'HUMECTATION : INFLUENCE DES
MODALITES D'HUMECTATION ET DE
L'ETAT INITIAL DES ECHANTILLONS**

Mémoire de fin d'études : Option Agronomie

Didier DINEL

Septembre 1988 -

ERRATUM

- P.3, au lieu de "les échantillons étaient caractérisés par leur porosité de leur indice des vides."
lire "les échantillons étaient caractérisés par leur porosité ou leur indice des vides."
- P.6, à la suite de "Alors que si le profil hydrique évolue comme sur la figure 3,"
ajouter "la contrainte de cisaillement au niveau du front reste invariable durant l'infiltration."
- P.6, au lieu de "il existe une épaisseur seuil de la couche sèche en dessus de laquelle devrait apparaître la fissuration."
lire "il existe une épaisseur seuil de la couche sèche en dessous de laquelle devrait apparaître la fissuration."
- P.16, à la suite de " * Fissuration sur la face inférieure"
ajouter " (cf. figure 20)."

AVANT - PROPOS

Ce mémoire a été réalisé à la Station de Science du Sol d'Avignon dans le cadre de l'Option Agronomie de l'E.N.I.T.A. de Dijon.

Je tiens à remercier chaleureusement P. STENGEL, Directeur de la Station, qui a dirigé ce travail.

Je remercie également, M. BOURLET et J. GUERIF, tant leur aide fût précieuse durant ce stage.

Mes remerciements vont également à toutes les personnes de la Station qui, à un moment ou à un autre, m'ont apporté aides, conseils et encouragements.

Enfin, je remercie N. LEITGOLD qui a bien voulu assurer la frappe de ce mémoire.

RESUME

Ce travail s'insère dans le cadre d'une étude sur la fissuration à l'humectation. Il avait pour objectif de vérifier l'existence d'une fissuration sur trois matériaux naturels (un matériau limoneux, limono-argileux et argileux) et de décrire le mécanisme du phénomène à partir d'hypothèses mécaniques.

Le travail a été réalisé en laboratoire, sur des massifs de terre cylindriques, continus et prélevés au champ après le compactage de la surface du sol. Ces massifs ont été réhumectés à potentiel nul avec des quantités d'eau différentes pour chaque échantillon.

Nous avons observé pour chaque massif, la fissuration apparue après la réhumectation et après la redistribution sur les deux faces.

Les résultats ont permis de mettre en évidence une fissuration sur les trois matériaux. La fissuration observée sur la face supérieure en retrait était comparable à celle obtenue sur des matériaux remaniés, alors que la fissuration sur la face inférieure en réhumectation était plus faible.

L'analyse des intensités de la fissuration obtenues sur les faces supérieures, au retrait et les faces inférieures des matériaux limono-argileux et argileux a montré que le mécanisme de la fissuration relatif à chacune de ces faces pouvait s'expliquer, en partie, à partir des hypothèses mécaniques énoncées.

L'apparition d'une fissuration sur la face supérieure des massifs limoneux et argileux et l'absence de fissuration de la face inférieure des massifs argileux pour de faibles humidités, ont fait apparaître la multiplicité des paramètres à prendre en compte pour la description du mécanisme de la fissuration. Notamment, le rôle des conditions mécaniques imposées par le dispositif d'humectation

SUMMARY

This work deals with soil cracking during a wetting process. The first objective was to verify the occurrence of the phenomena on three different materials, a loam, a clay-loam and a clay, respectively. The second objective was to try to explain the mechanism of soil cracking during wetting from mechanistic assumptions.

Laboratory experiments were carried out on cylindrical undisturbed soil samples taken in the field after compaction of the soil surface. Various amounts of water were used to irrigate the samples. A zero matrix potential was maintained at the surface of the soil during the infiltration process.

For each sample, we studied by means of image analysis, the cracking pattern developing on the two faces during and after the re-wetting of the soil. Cracking was observed for all the materials used. Soil shrinking characteristics at the top of the sample were roughly the same as those that can be observed for disturbed materials. Inversely, at the bottom of the sample, that was in a re-wetting phase, the cracking intensity we observed was less important. Concerning loamy and clay loam materials, the analysis of the cracking intensity for the two faces of the various samples we analyzed, revealed that the cracking mechanism proper to each face, that is to say in fact proper to a drying or wetting phase, could in part be explained using the mechanistic assumptions referred above. The fact that for clay materials and low water content, no cracking could be observed at the bottom of the samples, while it was present at the top, wetter situation, for clay and clay loam materials, indicates that a large number of parameters should be considered in order to describe correctly the phenomena. In particular, it seems that the "constraints" related to the experimental device, play a non negligible role.

PLAN

I. INTRODUCTION

II. MATERIELS ET METHODES

II.1. Objectifs

II.2. Dispositif d'humectation

II.3. Préparation des échantillons

II.3.1. Echantillons naturels

II.3.2. Echantillons remaniés

II.3.3. Préparation des massifs

II.3.4. Mesures de densité

II.4. Protocole expérimental

II.4.1. Quantité d'eau apportée

II.4.2. Répétitions

II.4.3. Mesures

II.5. Matériaux étudiés.

III. HYPOTHESES MECANQUES CONCERNANT LA FISSURATION A L'HUMECTATION

III.1. Fissuration durant l'apport d'eau

III.2. Fissuration à la redistribution

IV. RESULTATS

IV.1. Etude des conditions expérimentales

IV.1.1. Caractérisation de l'état initial des massifs de terre

IV.1.2. Conditions mécaniques

IV.1.3. Technique d'humectation

IV.1.4. Etude des cinétiques d'humectation

IV.2. RESULTATS DE LA FISSURATION

IV.2.1. Fissuration au cours de l'apport d'eau sur les matériaux naturels

IV.2.2. Fissuration au cours de la redistribution

IV.2.3. Influence de l'état initial des échantillons sur la fissuration

V. DISCUSSION

CONCLUSION

I. INTRODUCTION

Les processus de fissuration, lors des cycles d'humectation-dessiccation, jouent un rôle prépondérant comme mécanisme naturel d'évolution de la structure des sols.

D'un point de vue agronomique, l'étude de ces processus présente un intérêt majeur pour la prévision des possibilités de régénération des couches de surface en l'absence de travail du sol (STENGEL, 1983) et/ou la compréhension de la fragmentation des mottes de type Δ (MANICHON, 1982) formées lors de la division de couches compactées sous l'effet d'un outil.

Dans un tout autre domaine, la description du système fissural est indispensable à l'étude du fonctionnement hydrique du sol. Cette description revêt une importance capitale lorsque cette porosité évolue avec l'humidité ; tel est le cas des sols argileux, gonflants où les phénomènes de retrait et de gonflement se traduisent par une modification de l'espace poral avec la création ou la fermeture de fissures.

Ces processus de fissuration résultent des variations de volume du matériau terreux en relation avec ses variations d'humidité. Ces variations peuvent se faire dans le sens d'un gonflement, lors d'un épisode d'humectation ou au contraire dans le sens d'un retrait lors de la dessiccation.

Des travaux réalisés à la Station de Science du Sol d'Avignon ont permis de mieux discerner les rôles spécifiques de l'humectation et de la dessiccation dans l'élaboration de la maille fissurale. Ainsi, un apport d'eau à un volume de sol sec peut induire une fissuration plus fine que la dessiccation et ceci dans des matériaux très divers (CARDON-DUBOIS, 1985).

En ce qui concerne la fissuration à l'humectation, des travaux plus récents, réalisés en laboratoire, ont précisé les conditions d'existence des fissures. Ainsi, il faut à la fois une réhumectation à potentiel élevé et une humidité initiale inférieure au point d'entrée d'air (DE LEON, 1987).

Mais les résultats acquis l'ont été sur des matériaux remaniés, de façon à les rendre initialement continus et, du fait des conditions expérimentales, la description du phénomène était limitée à l'observation de la face supérieure des massifs.

Il convenait donc d'une part, de vérifier l'importance réelle du phénomène sur des échantillons naturels, afin de s'assurer qu'il n'est pas fortement amplifié par la technique de préparation de massifs continus. D'autre part, il était nécessaire de redéfinir les conditions expérimentales afin de pouvoir observer la fissuration sur les deux faces (supérieure et inférieure) et à l'intérieur du massif.

II. MATERIELS ET METHODES.

II-1. Objectifs.

Les conditions expérimentales des travaux cités précédemment étaient telles que les fissures formées étaient observées directement sur la face supérieure, restée visible, tandis que la base du massif était en contact permanent avec la source d'eau (couche de sable grossier, saturée en eau), jusqu'à l'obtention d'un équilibre (les variations de la quantité d'eau absorbée par le massif en 24h après saturation sont négligeables). Ceci permettait de mettre en évidence, par l'absence d'une redistribution, le rôle direct de la phase d'humectation dans la fissuration.

Mais ces conditions ne permettaient pas de discerner les rôles respectifs de l'apport d'eau et de la redistribution.

Or, une expérience réalisée in situ (CARDON-DUBOIS, 1985) avait montré l'importance de cette dernière phase dans l'élaboration d'un réseau dense de fissures, observé à la surface d'un sol argileux initialement continu et arrosé par aspersion.

Pour étudier le mécanisme de la fissuration relatif à chacune de ces phases, il était nécessaire de mettre en évidence ces deux types de fissuration et de modifier le dispositif d'humectation afin de pouvoir les observer.

II-2. Dispositif d'humectation.

Le dispositif est présenté à la figure 1.

Celui-ci devait donc répondre à deux objectifs :

- D'une part, la face humectée devait rester visible au cours de l'humectation et ne devait pas être perturbée par un contact mécanique avec la source d'eau.

- D'autre part, la réhumectation devait se faire à potentiel nul, afin d'avoir un potentiel de référence commun et constant dans le temps, à tous les sols .

Nous avons donc été conduit à choisir un mode d'apport sous forme de gouttes à l'aide de dix-neuf capillaires ($\varnothing \approx 0,8$ mm) disposés régulièrement en quinconce au-dessus du massif. La hauteur de chute des gouttes a été limitée à un centimètre afin de limiter la dégradation de la surface sous l'effet des impacts et de la turbulence de l'eau.

L'obtention du potentiel nul à la limite supérieure de l'échantillon était contrôlée en veillant à maintenir en permanence un film d'eau à la surface du massif. Ceci nous a obligé à faire varier le débit (entre 8 mm/h pour le sol argileux à faible infiltrabilité et 65 mm/h pour le sol limoneux à forte infiltrabilité et fort ruissellement sur les bords lié aux effondrements des parois latérales) en modifiant la charge d'eau à mesure que l'infiltrabilité variait au cours du temps.

Egalement, la réhumectation ne devant se faire que par la face supérieure du massif, nous étions tenus d'éviter l'infiltration de l'excès d'eau par les faces latérale et inférieure. Pour ce faire, nous avons appliqué une fine couche de graisse sur la surface latérale et laissé reposer le massif sur une grille perforée au-dessus du récipient contenant l'eau non infiltrée.

II-3. Préparation des échantillons.

L'étude a porté sur des massifs de terre cylindriques dont l'épaisseur variait de 4,2 à 4,6 centimètres et le diamètre de 10,3 à 11 centimètres. Pour chaque matériau, deux types d'échantillons ont été réalisés.

II-3.1. Echantillons naturels.

L'objectif était d'obtenir des massifs dont l'état structural soit proche de celui des mottes \blacktriangle trouvées à la surface des sols travaillés. Cet état est caractérisé par une porosité structurale nulle et des faces de rupture lisses et de formes conchoïdales (MANICHON, 1982). Pour ce faire, nous avons réalisé un compactage à la surface du sol nu à l'aide d'une dame mécanique et avons prélevé les massifs par

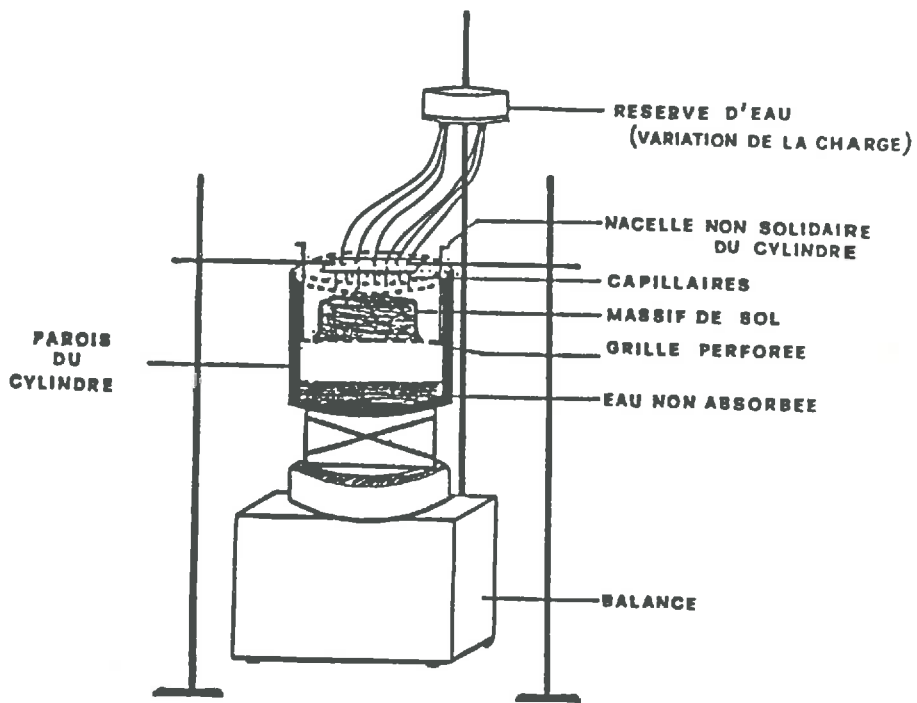


FIGURE 1 : SCHEMA DU DISPOSITIF DE REHUMECTATION.

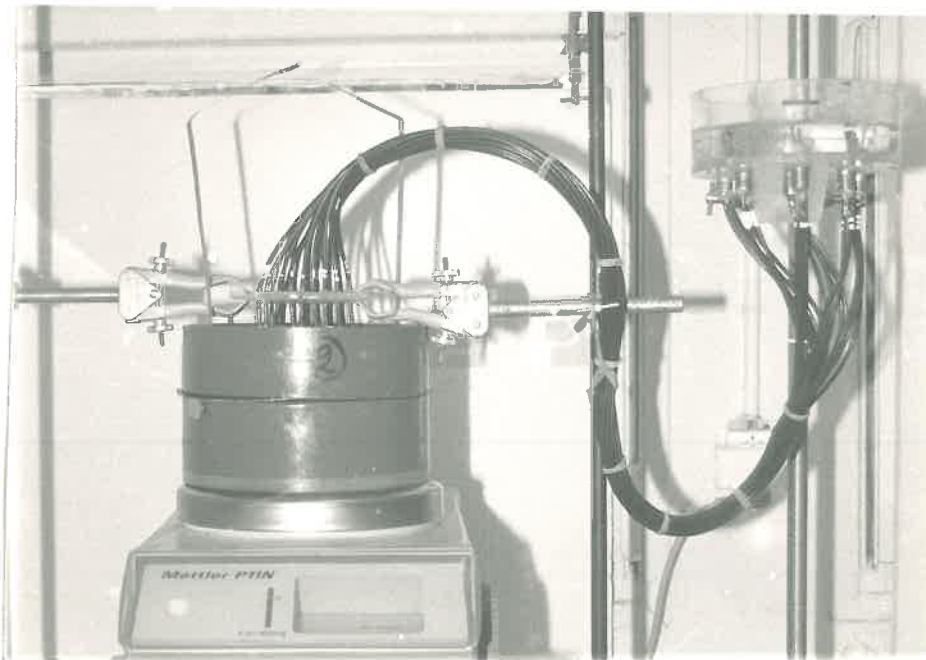


PHOTO 1. VUE DU DISPOSITIF.

la méthode des cylindres ($h/\varnothing \approx 0,44$). Le compactage a été effectué sur une surface de deux mètres carrés en deux passages, espacés de vingt-quatre heures afin qu'il y ait un drainage de l'eau en profondeur. L'humidité au champ pour le matériau limoneux était de 25 %, de 15 % pour le sol argileux et de 25,7 % pour le sol limono-argileux.

II-3.2. Echantillons remaniés.

Outre ces échantillons naturels, nous avons préparé des massifs remaniés afin de mettre en évidence la différence d'intensité de la fissuration liée au type de préparation.

L'objectif dans ce cas était de préparer des massifs de sols continus, rendus homogènes par un malaxage mécanique prolongé du sol tamisé à 2 mm en présence d'une quantité d'eau correspondant à 1,9 Heq soumis à un ressuyage prolongé sur sol sec (équilibre \approx capacité de rétention). Le protocole de préparation (STENGEL et BOURLET, 1987) est résumé à la figure 2.

II-3.3. Préparation des massifs.

Tous les massifs ont été séchés à l'air. Pour les échantillons argileux, deux faces seulement étaient soumises à l'évaporation, ceci permettant d'éviter la fissuration durant la dessiccation (CARDON-DUBOIS, 1985).

Afin de faciliter la réhumectation, la prise de vue photographique et de préciser les mesures de volume, il était nécessaire, au préalable, de polir les surfaces des massifs.

II-3.4. Mesures de densité.

Les échantillons étaient caractérisés par leur porosité de leur indice des vides évalués à partir de la mesure des densités. Celles-ci étaient mesurées par différentes méthodes selon l'échantillon étudié :

- La densité sèche des échantillons prélevés avant le compactage a été déterminée par la méthode à la paraffine.

- La densité sèche des échantillons naturels et remaniés a été évaluée à partir des mesures de la masse et du volume des massifs polis. Le volume était calculé à partir de la mesure de l'épaisseur et de la moyenne des mesures des diamètres supérieur et inférieur des cylindres, chacune de ces mesures étant la moyenne de cinq répétitions.

- la densité texturale a été évaluée par la méthode des agrégats (\varnothing 2-3 mm) au pétrole (MONNIER, STENGEL, FIES, 1973).

II-4. Protocole expérimental.

La fissuration résulte de contraintes liées aux variations de volume du matériau sous l'effet des variations d'humidité.

Afin de déterminer l'origine et l'évolution de ces contraintes et d'observer la cinétique de fissuration, il était intéressant pour des profils hydriques différents de pouvoir connaître les gradients d'humidité au sein du massif après la réhumectation et après la redistribution et leurs effets sur le gonflement du matériau.

FIGURE 2: PREPARATION DES ECHANTILLONS REMANIES.

Calcul de 1.9 HE de l'échantillon
tamisé (2mm)

Addition d'eau dégazée

Malaxage à la main

4 H

Addition d'eau jusqu'à 1.9 HE

Malaxage mécanique

Obtention de la boue

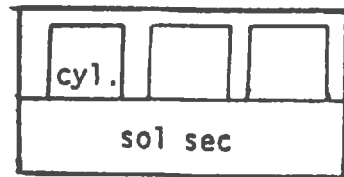
Repos de la Boue à 5° C

12 H

Continuation du Malaxage

2H

Placement de la boue dans les
cylindres métalliques (Ø 11cm;
hauteur 4,8cm) du système de
ressuyage:



1/2 H

Période de Ressuyage
(en fonction de la texture)

5 -
30 Jours

Dessechement à l'air (faces latérales non
soumises à l'évaporation)



Variable

II-4.1. Quantité d'eau apportée.

Pour les matériaux naturels, nous avons retenu cinq doses d'apport ; 5, 10, 14, 17 ou 20 millimètres d'eau. Les doses correspondant aux divers matériaux et les temps d'humectation sont reportés dans le tableau 2 (cf. IV-1.). Des doses plus élevées n'ont pu être envisagées du fait des contraintes liées au dispositif d'humectation et à la manipulation des massifs lors des prises de vues photographiques.

Pour les matériaux remaniés, seule la dose de 10 millimètres a été choisie.

II-4.2. Répétitions.

Pour chaque dose, nous avons envisagé de réhumecter trois massifs :

- Un premier massif était détruit après la réhumectation dans le but d'étudier la fissuration en fin d'humectation.

- Un deuxième massif était détruit 24 h après la fin de l'humectation afin d'étudier la fissuration spécifiquement induite par la redistribution.

Des mesures d'humidité étaient réalisées sur une moitié du massif, tandis que sur l'autre nous faisons des observations visuelles de la fissuration interne.

- Un troisième massif était conservé après la phase de redistribution, mis à sécher à l'air et imprégné d'une résine polyester, afin de pouvoir réaliser des coupes planes observables directement à l'analyseur d'images.

II-4.3. Mesures.

a) Cinétique d'humectation.

La mesure de la porosité à partir des masses volumiques ne suffit pas à caractériser valablement l'espace poral car elle donne une indication sur la quantité totale des vides mais n'apporte aucune information sur la répartition du volume des pores dans le massif. L'étude des cinétiques d'humectation sur chacun des massifs devait donc nous permettre d'acquérir des informations supplémentaires sur l'état du matériau avant et peut être pendant la réhumectation. En effet, la conductivité hydraulique et donc l'infiltrabilité, est fortement influencée par le diamètre des pores mais surtout est liée à la forme, la continuité et à la répartition de ceux-ci (FIES, 1982).

La détermination du poids d'eau infiltrée dans le massif en fonction du temps se faisait à partir de deux pesées. La première donnait la masse d'eau totale apportée. La deuxième pesée, réalisée sans le massif donnait une estimation de la masse d'eau non infiltrée. La différence de ces deux pesées donnait donc une estimation de la masse d'eau effectivement retenue par le massif.

Ce système permettait de suivre la cinétique d'humectation avec une précision acceptable puisque la masse d'eau absorbée, mesurée par cette méthode n'excédait jamais de plus de 3 % celle mesurée par une pesée directe à la fin de la réhumectation.

b) Mesure d'humidité.

La grande variabilité d'humidité dans le massif nous imposait d'effectuer un grand nombre de mesures quand cela était possible (6 prélèvements par couche de 1 cm d'épaisseur).

La détermination de l'humidité pondérale a été effectuée par la méthode gravimétrique avec séchage à l'étuve à 105°C durant 24 h.

c) Observation de la fissuration.

L'étude de la fissuration a été réalisée au moyen d'un analyseur d'images (PERICOLOR 2000).

Les différentes étapes du traitement étaient :

- Photographie des faces inférieures et supérieures des massifs après la réhumectation et la redistribution,
- Acquisition des images des négatifs photographiques sur l'analyseur par l'intermédiaire d'une caméra vidéo,
- Numérisation de l'image,
- Traitement de l'image numérisée : extraction des fissures et calcul des paramètres.

L'organigramme de la méthode retenue pour l'extraction des fissures est donné dans l'annexe 1.

Les paramètres étudiés étaient :

- surface totale des fissures,
- longueur totale des fissures par unité de surface,
- granulométrie des fissures : distribution des longueurs par classe d'épaisseur.

Il faut préciser dès maintenant que ces opérations successives s'accompagnent d'erreurs dont il est difficile d'estimer l'ordre de grandeur. Ainsi le résultat final de la fissuration donné par l'analyseur est surestimé par la présence de "bruits" et sous-estimé du fait de l'impossibilité de prendre en compte les fissures les plus fines. Cette erreur est certainement négligeable pour la fissuration observée sur les faces inférieures mais elle est importante pour celle observée sur les faces supérieures des massifs. En effet, cette face est perturbée par l'apport d'eau et les contrastes photographiques sont moins importants.

II.5. Matériaux étudiés.

L'étude porte sur les trois matériaux dont les caractéristiques analytiques sont portées dans le tableau 1.

Ils ont été choisis pour leurs teneurs en argile et surtout pour leurs propriétés de gonflement très différentes (PINOCHET, 1981).

Le choix des matériaux en fonction de cette dernière propriété était appuyé par les résultats antérieurs (DE LEON, 1987), lesquels montraient que le gonflement potentiel pouvait être pris comme critère de classement de l'aptitude à la fissuration des différents sols.

III- HYPOTHESES MECANQUES CONCERNANT LA FISSURATION A L'HUMECTION.

Les résultats de la fissuration peuvent s'interpréter, a priori, à partir de l'étude des contraintes mécaniques, qui se développent lorsque le volume du matériau varie. Il est donc intéressant avant d'analyser

Origine Matériaux	Marçon Limoneux	Boigneville Limono-argileux	Les Vignères Argileux
< 2 μ v	112	259	513
Composition 2-20 μ v	297	281	306
Granulométrique 20-50 μ v	447	372	78
50-200 μ v	108	67	76
200-2000 μ v	36	21	27
Matière organique %	11,5	22,5	20,1
C.E.C. meq/100 g	6,1	13,8	22,1
pH eau	6,5	6,2	8,2

Tableau 1 : Composition des matériaux étudiés.

les résultats de l'expérimentation, de faire au moins une étude schématique des forces et de voir leurs conséquences sur la morphologie des fissures et de la maille fissurale.

III-1. Fissuration durant l'apport d'eau.

Le schéma explicatif est présenté à la figure 3.

Le gonflement de la partie humidifiée supérieure induit des contraintes de traction dans la partie sèche du massif et de cisaillement au niveau de l'interface des couches. La couche sèche s'oppose quant à elle au gonflement de la couche humide et induit de ce fait une contrainte de compression dans cette zone humide.

Il peut en résulter deux types de fissuration :

- Soit une fissuration horizontale (par rapport au front d'humectation), si la contrainte de cisaillement peut dépasser la cohésion du matériau situé dans la zone de fort gradient hydrique, Δz . L'intensité de ces contraintes de cisaillement est certainement liée au gradient de déformation développé dans cette zone.

- Soit une fissuration verticale (par rapport au front d'humectation) dans la zone sèche si la force de traction exercée dans cette zone dépasse la résistance en traction du matériau sec. L'apparition de cette fissuration apparaît d'autant plus probable que le front d'humectation progresse en profondeur. En effet, la résistance en traction de la couche sèche diminue avec son épaisseur (e) :

$$R_T = r_t \cdot e$$

où r_t est la résistance en traction du matériau (exprimée en terme de contrainte)

et R_T est la résistance en traction de la couche (exprimée en terme de force).

Alors que si le profil hydrique évolue comme sur la figure 3 (il n'y a pas de modification des gradients hydriques au niveau du front d'humectation)

Ainsi, l'écart entre les forces de traction et les forces résistantes diminue au cours de l'humectation et il existe une épaisseur seuil de la couche sèche en dessus de laquelle devrait apparaître la fissuration.

III-2. Fissuration à la redistribution.

Le schéma explicatif est présenté à la figure 4.

L'origine de la fissuration dans la couche qui se réhumecte peut s'expliquer par un système de contraintes analogue au cas précédent. Cependant, l'intensité de cette fissuration devrait être moins importante (pour des conditions d'humidité et d'épaisseur de la couche humectée similaires) du fait de l'existence de la contrainte de compression exercée par la face supérieure en cours de retrait et des gradients hydriques de moindre importance lors de cette phase.

Dans la couche supérieure, le retrait parallèle au plan de cisaillement est limité d'une part par la résistance au cisaillement et d'autre part par les forces de traction exercées par la zone sous-jacente qui gonfle lors de la redistribution. Il en résulte donc une contrainte de traction dans cette couche et de ce fait une fissuration verticale par rapport au plan de cisaillement.

Hypothèses mécaniques de la fissuration

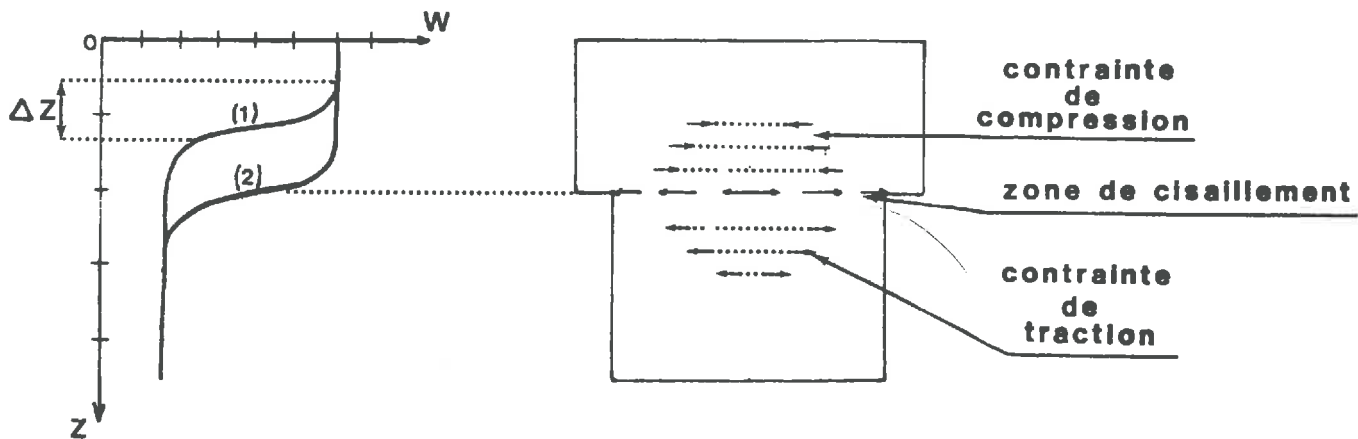


Figure 3: Fissuration à l'humectation.

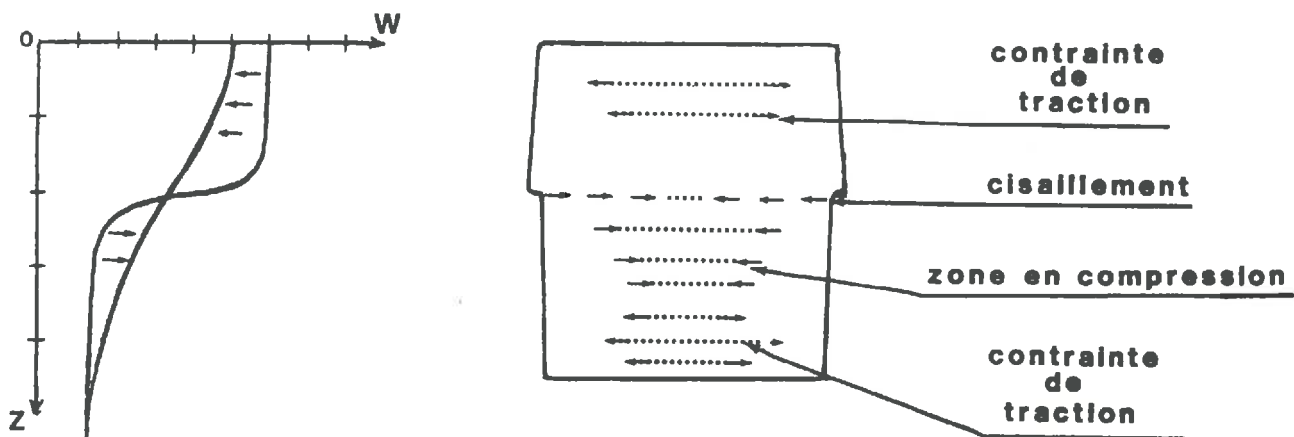


Figure 4: Fissuration à la redistribution.

Dans ce cas, la morphologie de la maille fissurale peut être interprétée à partir d'un modèle élastique, plan (DINH, 1974) étendu au cas de la fissuration par dessèchement d'une couche de matériau terreux initialement continue, homogène et d'épaisseur très faible (STENGEL, 1988).

Ce modèle permet d'explicitier la relation linéaire qui existe entre la taille des éléments structuraux (l) et l'épaisseur de la couche en dessèchement (e) :

$$l = (r_t / r_c) \cdot e$$

où r_t est la résistance en traction du matériau humide
et r_c la résistance au cisaillement.

Dans notre analyse, il sera certainement difficile de mettre en évidence l'effet propre de l'épaisseur de la couche humectée sur la maille de fissuration. En effet, en faisant varier la dose, on fait varier effectivement l'épaisseur de la couche humectée, mais aussi l'humidité finale de la couche, donc son amplitude de retrait et l'intensité des forces de traction, exercées par la couche sous-jacente pendant la redistribution.

IV- RESULTATS

IV-1. Etude des conditions expérimentales.

IV-1.1. Caractérisation de l'état initial des massifs de terre.

Les caractéristiques des massifs sont portées dans le tableau 2.

a) Résultat du compactage.

La comparaison de l'indice des vides structural moyen du sol en place avant le compactage et l'indice des vides structural moyen des massifs compactés montre qu'il y a bien eu une réduction de l'espace poral structural pour les trois matériaux.

Mais une étude détaillée de ces indices montre qu'il subsiste une porosité structurale pour les massifs argileux ($\approx 7\%$) et les massifs limono-argileux ($\approx 2\%$). La majeure partie de cette porosité disparaît lors de la dessiccation notamment pour le matériau argileux.

Des observations sur les faces de rupture de plusieurs massifs ont montré cependant qu'une porosité structurale, essentiellement concentrée à la base, persistait après le séchage. Des mesures de densité réalisées sur différentes épaisseurs d'un massif auraient sans doute permis de mettre en évidence un gradient de densité lié au compactage.

Les résultats des indices des vides structuraux des massifs remaniés et naturels compactés sont tout à fait comparables (après séchage à l'air) à l'exception du matériau limoneux pour lequel le remaniement s'accompagne d'une augmentation de la porosité structurale (présence de bulles d'air). Ces deux types de matériaux ne diffèrent que par leur indice des vides textural. Ceci témoigne de l'influence du mode de préparation sur l'organisation des éléments granulométriques.

Tableau 2. CARACTERISTIQUES INITIALES DES ECHANTILLONS DE SOLS

Résultats du Compactage (indice des vides)	Matériaux naturels												remaniés		
	avant compactage			après compactage			après séchage à l'air			après séchage					
	$e^T = 0,77$ $e^S = 0,1$			$e^T = 0,53$ $e^S = 0$			$e^T = 0,50$ $e^S = 0$			$e^T = 0,62$ $e^S = 0,09$					
Dose (mm)	5			1 0			1 4			1 7			1 0		
Répétitions	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Epaisseur (cm)	4,25	4,73	4,57	4,70	4,69	4,70	4,67	4,67	4,66	4,53	4,41	4,78	3,58	3,59	3,76
Diamètre (cm)	10,88	10,98	11,03	10,91	10,96	11,01	10,88	11,00	11,05	10,93	10,95	10,97	10,65	10,61	10,63
Masse volumique Sèche (gr/cm ³)	1,72	1,74	1,74	1,75	1,74	1,75	1,77	1,77	1,77	1,76	1,77	1,76	1,62	1,63	1,61
Temps D'humectation (mn)	14	17	15	50	37	48	70	77	117	140	138	115	150	145	150

MARCON:Sol limoneux

Tableau 2. CARACTERISTIQUES INITIALES DES ECHANTILLONS DE SOLS

Résultats du Compactage (indice des vides)	Matériaux naturels						remaniés
	avant compactage $e^T = 0,85$ $e^S = 0,17$		après compactage $e^T = 0,65$ $e^S = 0,04$		après séchage à l'air $e^T = 0,44$ $e^S = 0,02$		
Dose (mm)	5		1 0		1 4		1 0
Répétitions	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1) (2) (3)
Epaisseur (cm)	4,31	4,47	4,35	4,57	4,40	4,06	3,04 3,09
Diamètre (cm)	10,54	10,64	10,58	10,63	10,59	10,66	9,36 9,40
Masse volumique Sèche (gr/cm ³)	1,80	1,80	1,80	1,82	1,81	1,80	1,88 1,91
Temps D'humectation (mn)	35	23	35	110	45	55	455 680

BOIGNEVILLE: Sol limono-argileux

Tableau 2. CARACTERISTIQUES INITIALES DES ECHANTILLONS DE SOLS

Résultats du Compactage (indice des vides)	Matériaux naturels												remaniés		
	avant compactage			après compactage			après séchage à l'air			après séchage à l'air					
	$e^T = 0,78$ $e^S = 0,27$			$e^T = 0,52$ $e^S = 0,13$			$e^T = 0,30$ $e^S = 0$			$e^T = 0,36$ $e^S = 0,00$					
Dose (mm)	5			1 0			1 4			2 0			10		
Répétitions	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
Epaisseur (cm)	4,61	4,53	4,37	4,48	4,48	4,58	4,41	4,41	4,35	4,46			2,68	3,02	2,91
Diamètre (cm)	10,48	10,50	10,56	10,52	10,51	10,47	10,45	10,49	10,44	10,45			9,00	8,94	9,04
Masse volumique Sèche (gr/cm ³)	1,99	2,01	2,00	2,01	2,02	2,02	2,02	2,02	2,02	2,01			1,92	1,92	1,91
Temps D'humectation (mn)	47	55	57	80	90	92	145	105	160	170			120	95	120

LES VIGNERES:Sol argileux

b) Dimensions et masse volumique sèche des cylindres.

La différence des dimensions observée entre les matériaux est à mettre en relation avec l'amplitude de retrait propre à chacun d'eux.

Pour un même matériau, il est très difficile, a priori, de porter un jugement sur la comparaison des massifs du point de vue de leurs dimensions, sans avoir de références précises concernant l'effet des variations de ce paramètre sur l'intensité de la fissuration. Cependant, on a pu remarquer lors des observations visuelles que les variations d'épaisseur de la couche humide pour une même dose étaient du même ordre de grandeur que les variations de ces dimensions (plus ou moins 5 mm). Or l'apparition et le développement de la fissuration étant influencés par l'épaisseur de cette couche humide, on peut admettre que les variations de ces dimensions n'auront qu'un rôle négligeable sur les résultats de la fissuration.

En ce qui concerne les mesures des masses volumiques sèches des massifs, on peut également supposer que leur variation est négligeable car les variations de porosité qui en résultent sont inférieures à 1 % (ordre de grandeur de l'erreur de mesure de la porosité).

De cette façon, les massifs de terre (matériau naturel) sur lesquels porte l'expérimentation peuvent être considérés comme des massifs continus et dont l'état initial caractérisé par les dimensions et la mesure de la masse volumique sèche est comparable.

IV-1.2. Conditions mécaniques.

Outre la modification des conditions d'humectation, notre dispositif implique, par rapport aux dispositifs antérieurs, une modification des conditions mécaniques.

Ainsi le gonflement des surfaces latérale et supérieure de nos massifs n'est plus limité par la présence d'un freinage ou par un contact mécanique avec la source d'eau. Tandis que la face inférieure est soumise à un frottement avec la grille perforée et sa pression de gonflement est opposée à la résistance d'un joint de graisse, présent à la base, afin d'éviter l'infiltration de l'eau en excès.

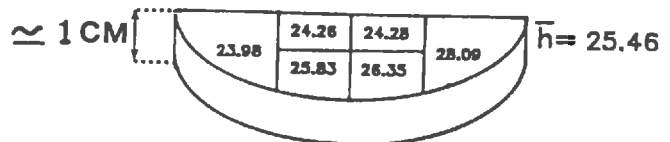
IV-1.3. Technique d'humectation.

Le potentiel nul en surface était obtenu par le maintien d'un film d'eau à la surface du massif. Ceci impliquait cependant un certain nombre de difficultés. Ainsi, il était difficile, voire même impossible sur certains massifs (matériau limono-argileux) de maintenir un film d'eau régulier et en permanence à la surface, du fait de la déformation de la couche saturée et des ruissellements résultant d'effondrements localisés des parois du massif. L'augmentation du débit pour corriger cette perte d'eau contribuait à accentuer le phénomène. Dans le cas du matériau limono-argileux s'ajoutait l'existence d'une fissuration préférentielle dans les zones proches des parois qui se traduisait par une humidité plus grande dans ces zones et une infiltration excessive et irrégulière.

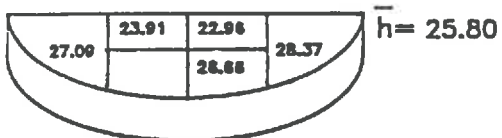
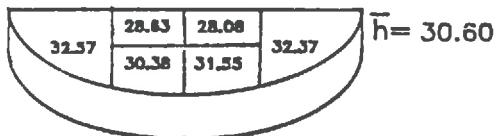
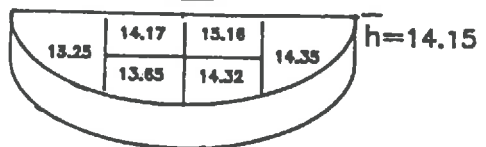
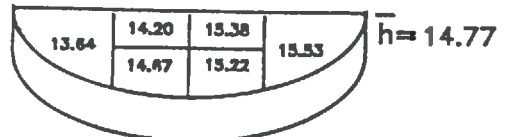
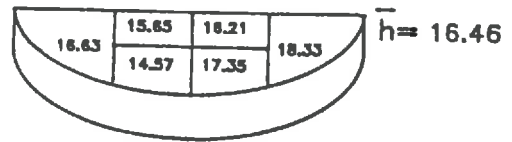
Par conséquent, avant toute interprétation, il est indispensable d'étudier la variabilité de la distribution de l'humidité dans le massif que suggéraient ces difficultés et de vérifier par l'analyse des profils hydriques la réalité de la condition de potentiel matriciel nul en surface.

Figure 5 : Répartition de la teneur en eau massique

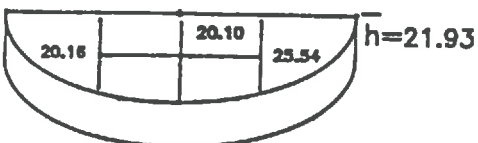
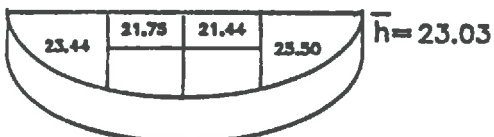
dans les différentes couches de sol des matériaux naturels après l'humectation (14 mm),



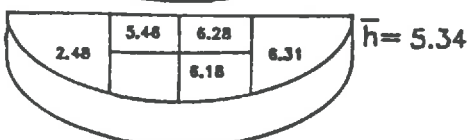
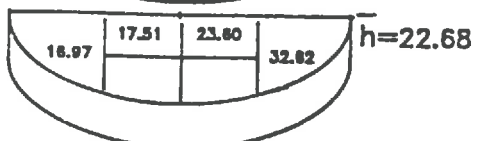
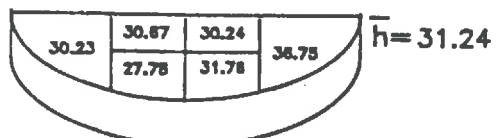
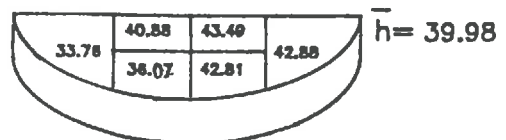
matériau limoneux



matériau limono-argileux



matériau argileux



a) Etude de la distribution de l'humidité.

L'étude des cartographies des humidités (cf. figure 5) des massifs naturels montre qu'il existe une variabilité dans la répartition de l'eau à l'intérieur d'une même couche de sol. Compte-tenu de l'échelle de mesure (volume $\ll 10 \text{ cm}^3$), celle-ci est tout à fait comparable à celle observée au champ (écart type voisin de 2 %) pour le matériau limoneux. Par contre, sur les massifs limono-argileux et argileux, elle est globalement plus importante.

Dans ces derniers cas, elle peut s'interpréter par l'hétérogénéité initiale des massifs, liée à la distribution de l'espace poral et par l'évolution de la porosité au cours de l'humectation qui se traduit par l'apparition de chemins préférentiels créés par la fissuration. A ce sujet, on a pu noter deux types de fissuration apparues lors de la réhumectation :

- une fissuration verticale le long des parois du cylindre de terre,
- une fissuration sub-horizontale fine et intense provoquée par les cisaillements successifs entre la zone humide et la zone sèche.

Les fortes humidités observées sur les bords des massifs limono-argileux (cf. figure 5) illustrent le premier de ces mécanismes. Tandis que le deuxième a été mis en évidence lors des observations visuelles.

La comparaison avec les massifs remaniés indique que l'ensemble de ces remarques restent applicables pour ces derniers. L'hétérogénéité de ces massifs étant par ailleurs moins grande du fait de leur mode de préparation, on est conduit à penser que le rôle de la fissuration dans cette variabilité est prépondérant.

Pour ces deux types de préparation, la variabilité plus grande observée au niveau du front d'humectation (cf. figure 5, matériau argileux) indique que ce dernier n'est pas plan.

Compte tenu de cette variabilité et du fait que les prélèvements sont effectués sur une moitié du massif, il est indispensable de vérifier si les moyennes des humidités prélevées sur cette partie représentent les humidités moyennes du massif.

b) Etude des bilans hydriques.

Les bilans hydriques sont présentés dans le tableau 3.

Si l'on admet les hypothèses suivantes :

- la masse volumique du massif avant la réhumectation est homogène.
- le gonflement est isotrope. Cette hypothèse n'est pas inconcevable dans notre cas puisque les massifs ne sont pas frettés mécaniquement et leurs dimensions sont réduites (HALLAIRE, 1985).
- il n'y a pas de fissuration dans la couche concernée.

Alors la quantité d'eau contenue dans chaque couche de sol peut être évaluée à partir de la formule (le détail du calcul est précisé dans l'annexe 2) :

$$m_e = ((W_F / (G + 1))^{1/3} - W_O) \cdot (M_{sa} / (1 + W_O)) \cdot (e/E)$$

m_e : la masse d'eau (gr) contenue dans la couche considérée.

W_F : l'humidité finale du massif après la réhumectation.

W_O : l'humidité initiale du massif sec à l'air.

Tableau 3 : Résultats des bilans hydriques.

Doses(mm)	Matériaux naturels						remaniés
	5	10	14	17	20	10	
<u>Sol limoneux</u>	Réhumectation	4,8	8,7	13,6	17,6		9,6
	Redistribution	4,9	10,0	13,6	17,1		9,7
<u>Sol limono-argileux</u>	Réhumectation	2,7	7,9	17,0			9,3
	Redistribution	6,1	8,8	12,1			9,3
<u>Sol argileux</u>	Réhumectation	5,0	10,6	14,4		21,3	9,2
	Redistribution	6,9	10,0	13,7			8,7

$W_o = 0,65 \%$ pour le matériau limoneux

$W_o = 2,5 \%$ pour le matériau limono-argileux

$W_o = 4,5 \%$ pour le matériau argileux

M_{sa} : la masse du massif sec à l'air

G : le gonflement de la couche de sol pour l'humidité WF, calculé à partir de la courbe retrait-gonflement.

E : épaisseur du massif

Les hypothèses exposées restent très simplificatrices étant donné qu'il existe probablement un gradient de densité au sein du massif et une fissuration non négligeable pour le matériau argileux. Les bilans ne sont donc que très approximatifs mais restent le seul outil pour contrôler la représentativité des profils hydriques.

Les bilans sur les matériaux limoneux et argileux fournissent des résultats cohérents, à l'exception des quantités d'eau correspondant aux doses de 10 mm (réhumectation) pour le sol limoneux et de 5 mm (redistribution) pour le sol argileux. L'écart important observé sur ces deux modalités ne peut être imputé qu'à un mouillage hétérogène des deux parties du massif. Les quantités d'eau des massifs correspondants à la dose de 14 mm du matériau argileux sont cohérentes, mais l'écart entre ces quantités pose le problème de la comparaison des profils à la réhumectation et à la redistribution, réalisés sur des massifs différents.

En ce qui concerne le matériau limono-argileux naturel, les bilans nous conduisent à nous interroger sur la représentativité des profils hydriques. Dans ce cas, les écarts importants observés peuvent être attribués aux caractéristiques même du matériau (arrangement des éléments granulométriques, graviers, résidus organiques). En effet, l'hétérogénéité apparaît systématiquement sur tous les massifs naturels alors qu'elle est peu importante pour les massifs remaniés.

c) Etude des profils hydriques

* forme des profils hydriques

Les hypothèses mécaniques font apparaître l'importance des gradients hydriques, existant entre la couche humide et la couche sèche, dans l'apparition et le développement de la fissuration au sein du massif.

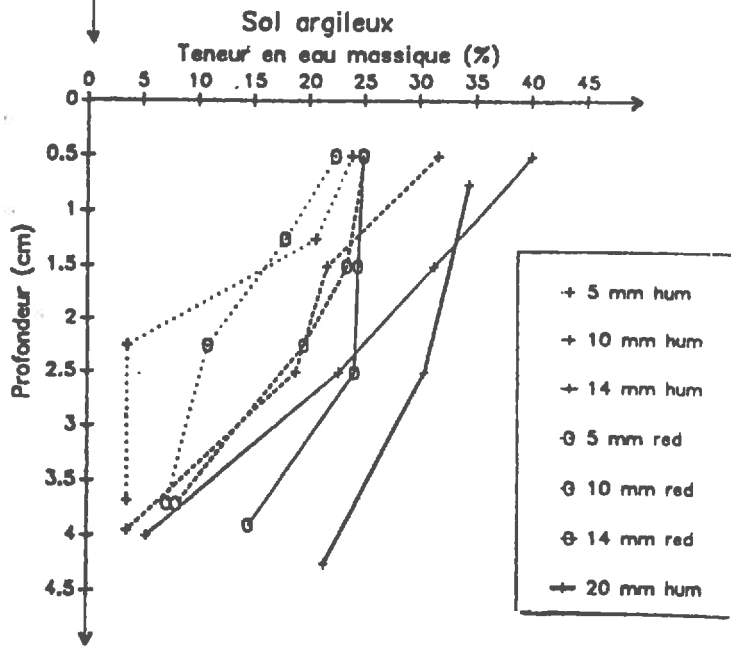
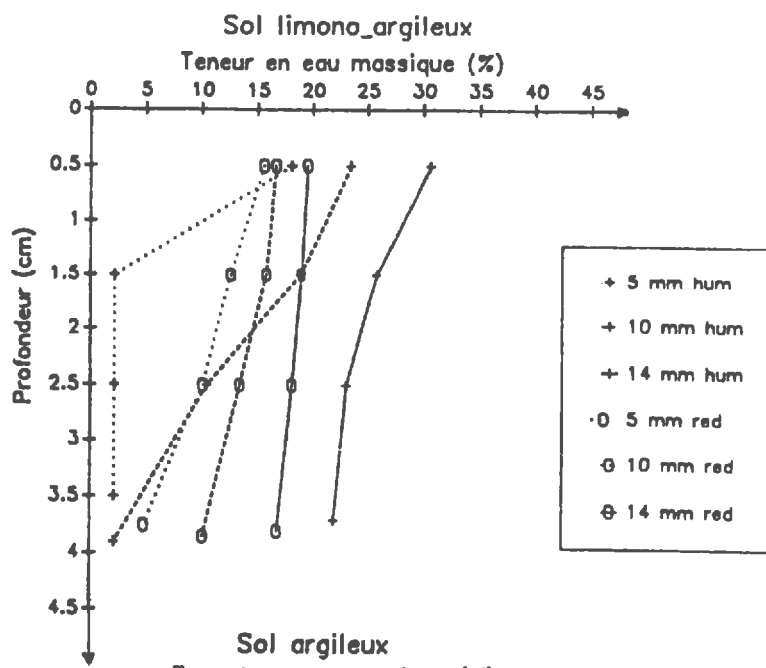
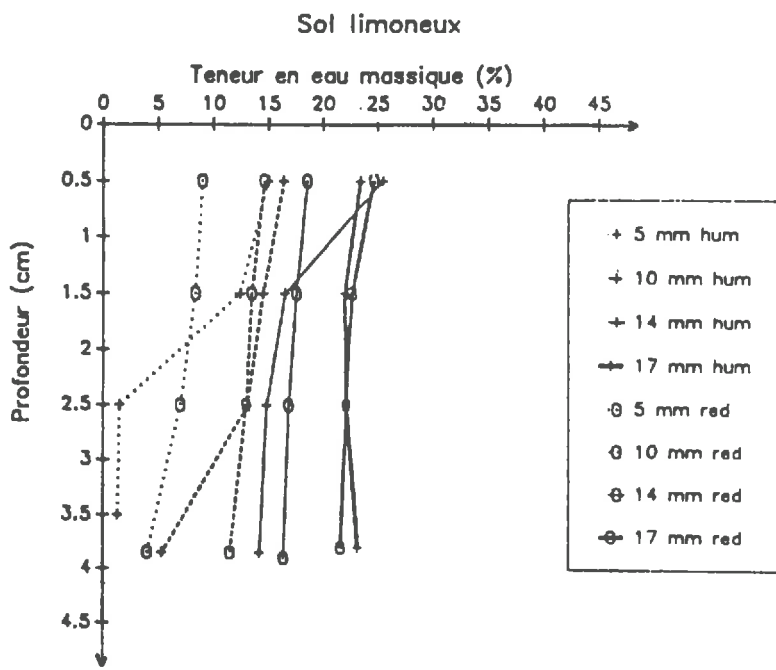
Il est donc intéressant d'étudier par l'analyse de la forme des profils hydriques, la localisation et l'intensité de ces gradients et de suivre leur évolution au cours de l'humectation ou de la redistribution par la comparaison de ces profils à des doses différentes.

Dans le cas des matériaux naturels, les profils hydriques ne permettent pas d'individualiser une couche humide sur une couche sèche et un front d'humectation au niveau duquel les gradients hydriques sont très marqués :

- Pour le matériau limoneux, la conductivité est très grande et la couche inférieure se réhumecte avant que la couche humide supérieure soit saturée (cf. graphique 6).

- Pour le matériau argileux, les profils hydriques font apparaître une couche humide et une couche plus sèche, mais au niveau du front d'humectation la zone des gradients est épaisse par rapport aux dimensions du massif et il est impossible de distinguer une limite bien définie entre ces deux couches. Ceci

Fig.6 Profils hydriques des matériaux naturels.



s'explique par l'hétérogénéité élevée du front d'humectation et par le prélèvement d'une couche d'épaisseur trop importante dans cette zone.

Néanmoins, la comparaison des profils hydriques à la réhumectation sur ce matériau argileux fait apparaître une progression de la couche humide en fonction de la dose.

De cette façon, il ne sera pas possible d'essayer de quantifier la fissuration à partir de la mesure de l'épaisseur de la couche humide (celle-ci n'étant pas mesurable avec précision). Mais il sera certainement possible de discuter d'une relation éventuelle entre l'intensité de fissuration et la quantité d'eau apportée.

Cependant, la comparaison des profils hydriques à l'humectation met en évidence une variation de la teneur en eau de la couche humectée en fonction de la quantité d'eau apportée (comparaison des profils 10 et 14 mm).

De ce fait, les propriétés mécaniques et l'allure de la distribution des contraintes dans le massif sont donc nécessairement différentes suivant la modalité et il devient difficile d'expliquer la fissuration à partir des hypothèses simplificatrices exposées précédemment.

L'étude des profils hydriques, à la redistribution, montre une diminution importante des gradients. Pour le matériau argileux, ceux-ci restent cependant relativement élevés.

La comparaison avec les profils hydriques des matériaux remaniés (figure 7) montre que les gradients et l'effet de la redistribution sont plus accentués dans ce dernier cas.

* étude des humidités de surface.

L'étude des humidités de la première couche des profils, en réhumectation, des matériaux naturels, ne démontre pas clairement la réalité de la condition du potentiel nul en surface. Ainsi pour aucun des matériaux, il n'apparaît une convergence des premiers segments de droite des profils vers une humidité constante en surface, caractéristique de l'humidité de saturation à potentiel proche de 0.

Dans le cas du matériau argileux, l'humidité de surface croissante en fonction de la dose est à mettre en relation avec la fissuration apparue lors de la réhumectation qui modifie la relation potentiel-teneur en eau.

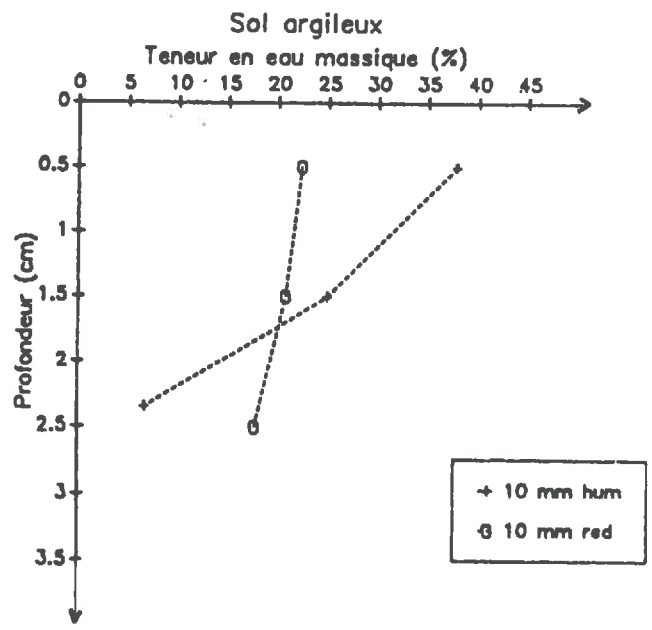
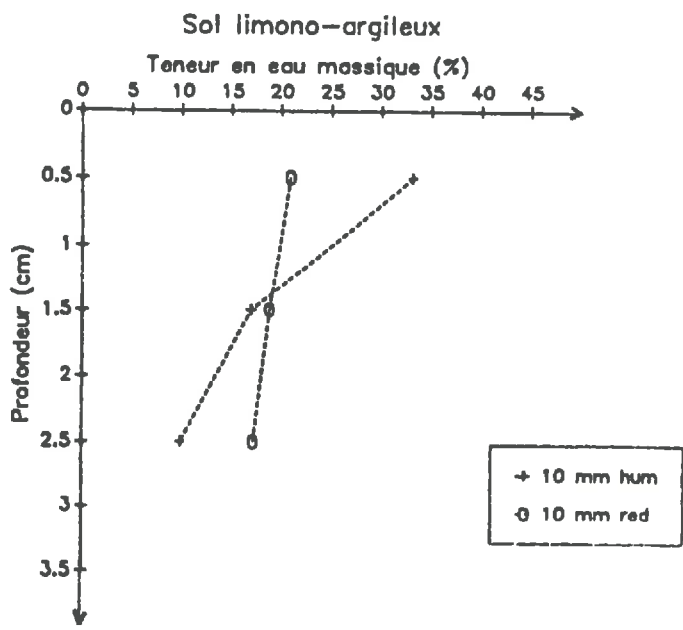
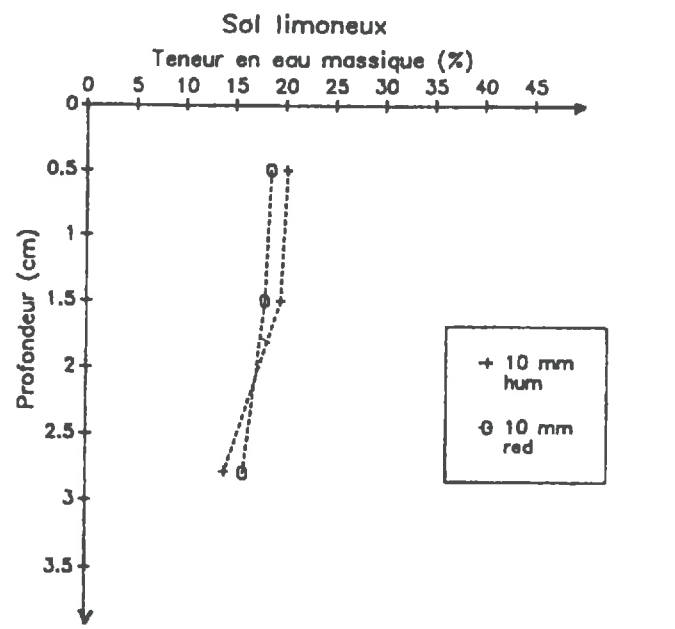
Les faibles humidités de surface des profils correspondant aux doses de 5 et 10 mm du sol limoneux peuvent s'interpréter si l'on conçoit qu'il y ait un début de redistribution entre la fin de la réhumectation et le moment des prélèvements des humidités ($t \approx 10$ mn).

Pour ce matériau, l'humidité de saturation est proche de 25 % (humidité moyenne du massif saturé).

Pour les matériaux remaniés, l'absence de comparaison entre profils hydriques ne permet pas de montrer une convergence des humidités de surface. Mais l'extrapolation des profils vers la surface conduit à des humidités élevées (35 % pour le matériau limono-argileux et plus de 40 % pour le sol argileux) qui laissent à penser que la condition du potentiel nul en surface est réalisée. Ces humidités élevées sont d'ailleurs proches des humidités de saturation obtenues sur les agrégats (33 % pour le sol limono-argileux et 45 % pour le sol argileux).

Pour le matériau limoneux remanié, les faibles humidités de surface peuvent s'expliquer par l'effet de la redistribution, de manière analogue à celle des matériaux naturels.

Fig.7 Profils hydriques des matériaux remaniés.



IV-1.4. Etude des cinétiques d'humectation.

Contrairement à ce que l'on pouvait attendre, l'observation des figures 8, 9 et 10 montre qu'il existe une faible variabilité de l'infiltrabilité sur les échantillons naturels d'un même matériau. Ainsi, l'écart d'infiltrabilité, le plus important et calculé pour la même quantité d'eau absorbée (100 gr), n'est que de 0,75, 0,5 et 0,4 gr/mn, respectivement pour les matériaux limoneux, limono-argileux et argileux. Ceci confirme l'état initial comparable des massifs, cet état étant caractérisé par la mesure de la masse volumique sèche portée sur les graphiques.

La figure 11 présente les cinétiques d'humectation des modalités, dont l'infiltrabilité correspond à l'infiltrabilité intermédiaire des trois répétitions. Son analyse montre que les trois matériaux diffèrent par leur allure de courbe :

- Le matériau limono-argileux présente une allure de courbe proche d'une droite.
- Le matériau limoneux a l'infiltrabilité la plus élevée au départ, mais celle-ci diminue progressivement à mesure qu'on tend vers la saturation du massif.
- Le matériau argileux a l'infiltrabilité la plus faible au départ, mais celle-ci augmente à partir d'une teneur en eau particulière.

L'accroissement rapide de l'infiltrabilité dans ce dernier cas est à mettre en relation avec l'apparition précoce de la fissuration. Remarquons à ce sujet que cette fissuration apparaît pour des quantités d'eau voisines et des temps peu différents.

Si l'on compare le classement de ces cinétiques avec celui obtenu par DE LEON (cf. figure 14), on constate que dans notre cas, l'ordre de classement respecte le classement des textures (diminution de l'infiltrabilité avec la teneur en argile), malgré la fissuration du matériau argileux.

Dans ce cas, on peut donc penser que le retrait a refermé les résidus de la porosité structurale initiale et de ce fait, au début de la réhumectation, l'infiltrabilité globale ne dépend que de la porosité texturale.

Ainsi, l'infiltrabilité initiale du matériau argileux naturel reste comparable à l'infiltrabilité du matériau remanié (cf. figure 13).

Au cours de l'humectation, le matériau naturel argileux fissure et son infiltrabilité s'accroît fortement et n'est plus comparable avec celle des matériaux remaniés, qui n'ont pas fissuré. Dans ce cas, l'infiltrabilité dépend fortement des transferts d'eau dans les fissures.

Cette différence dans la fissuration entre les échantillons naturels et remaniés est difficilement explicable, sauf si l'on admet qu'il existe une hétérogénéité mécanique au sein des massifs naturels qui favorise cette fissuration.

Pour les autres matériaux, on ne peut pas, à ce stade, savoir si l'infiltrabilité, toujours plus grande des matériaux naturels par rapport à celle des remaniés, résulte de l'effet d'un résidu de porosité structurale (sauf si l'on admet que le remaniement n'a pas modifié l'organisation texturale). Cependant, on peut remarquer que la variabilité de l'infiltrabilité des matériaux naturels est beaucoup plus grande que la variabilité des matériaux remaniés (cf. figure 12). Or, ceux-ci sont continus et homogènes du fait du mode

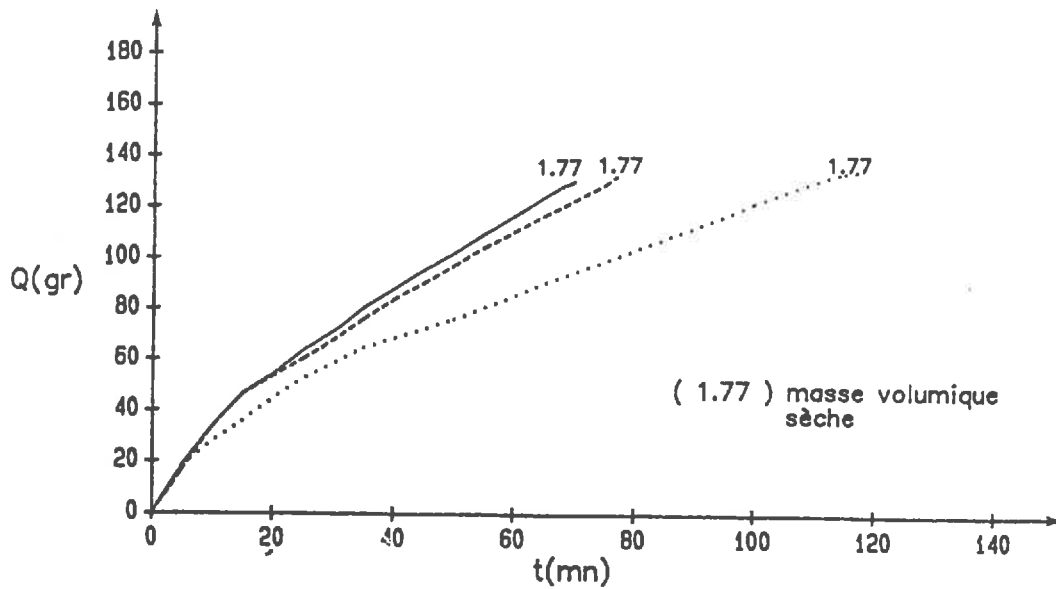


Figure 8: Variabilité des cinétiques d'humectation des matériaux limoneux (14 mm).

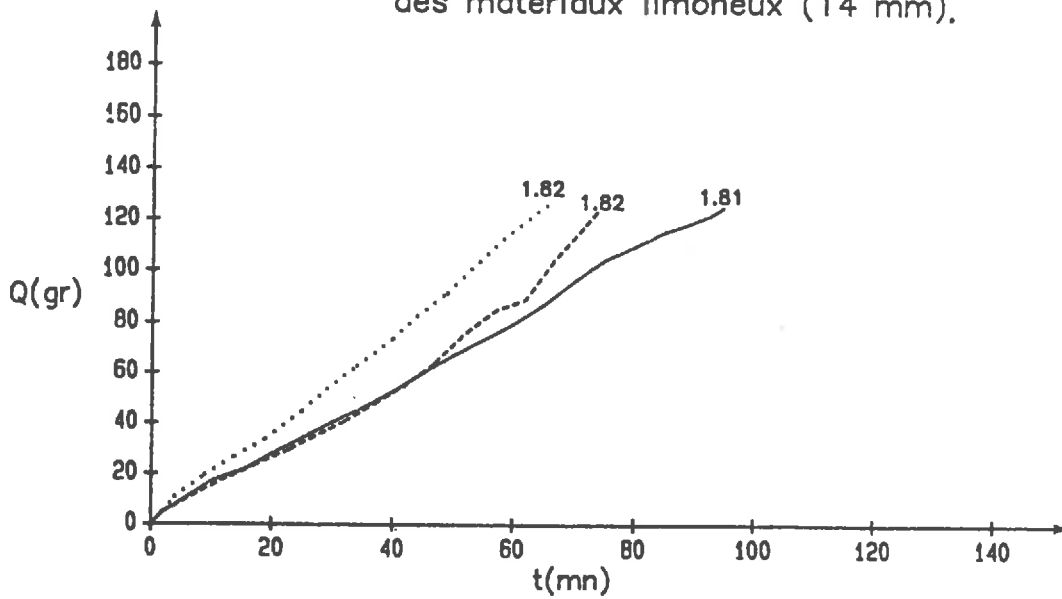


Figure 9: Variabilité des cinétiques d'humectation des matériaux limono-argileux (14 mm).

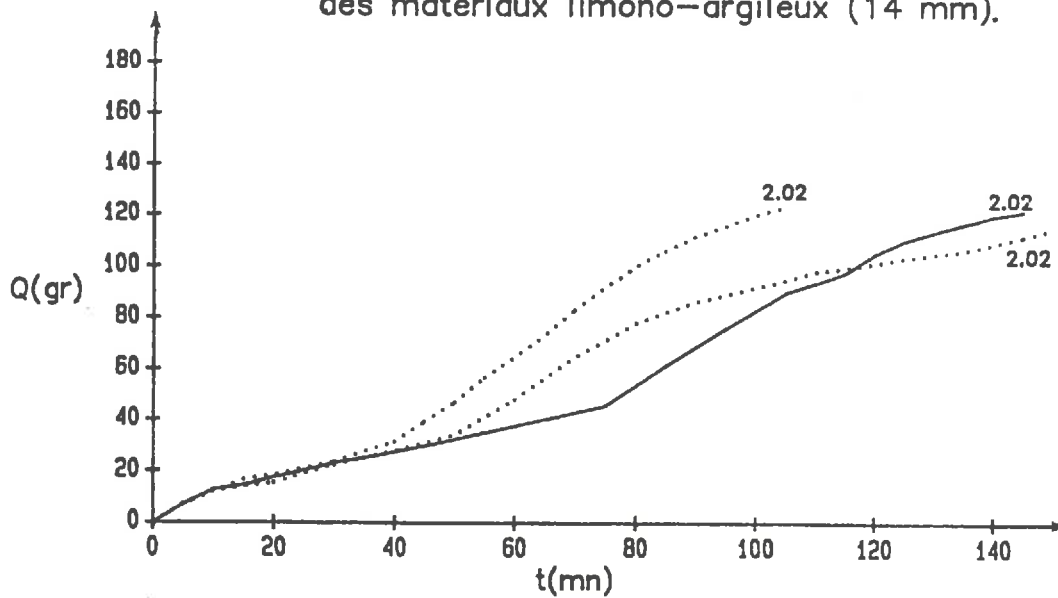


Figure 10: Variabilité des cinétiques d'humectation des matériaux argileux (14 mm).

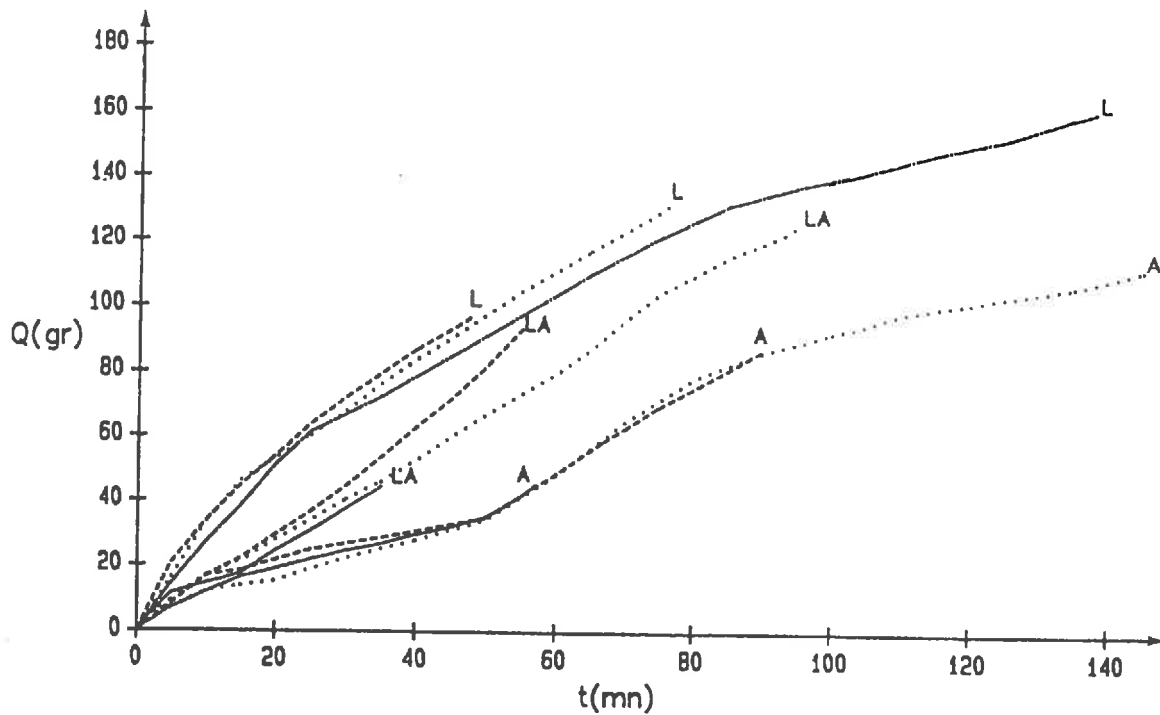


Figure 11: Variabilité des cinétiques d'humectation des 3 matériaux naturels.

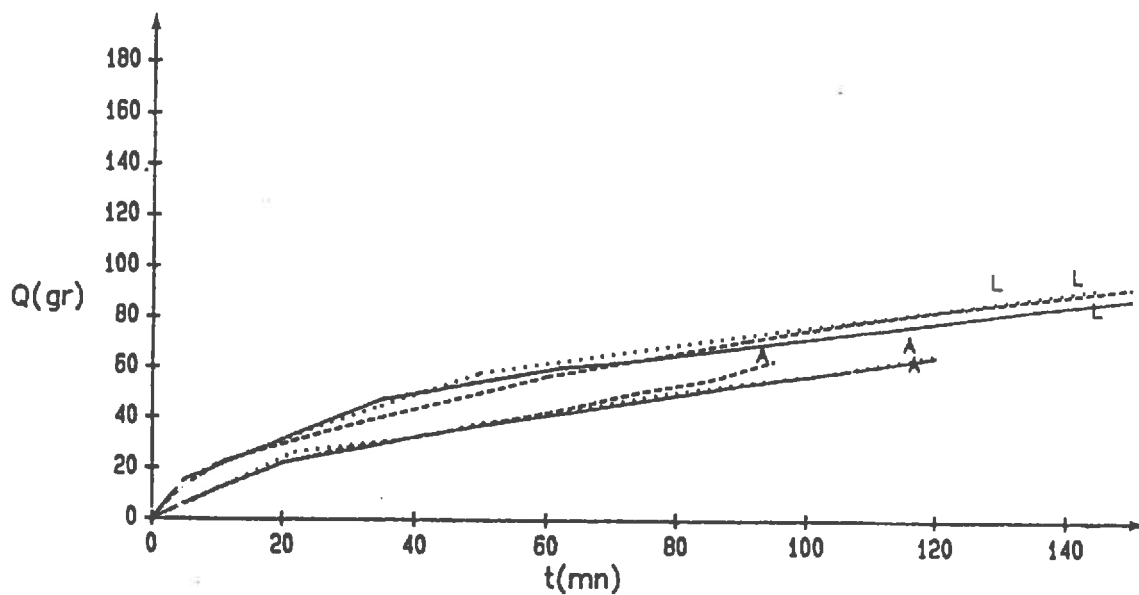


Figure 12: Variabilité des cinétiques d'humectation des matériaux limoneux et argileux remaniés (10 mm).

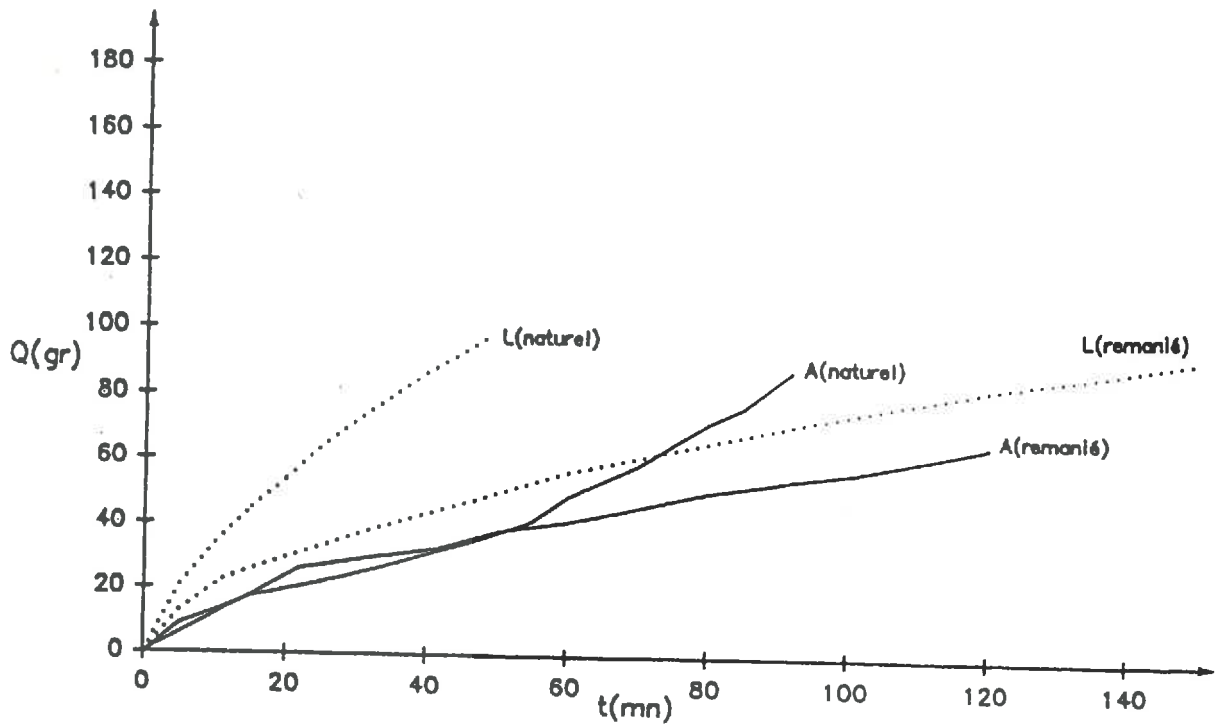


Figure 13 Comparaison des cinétiques d'humectation des matériaux naturels et remaniés.

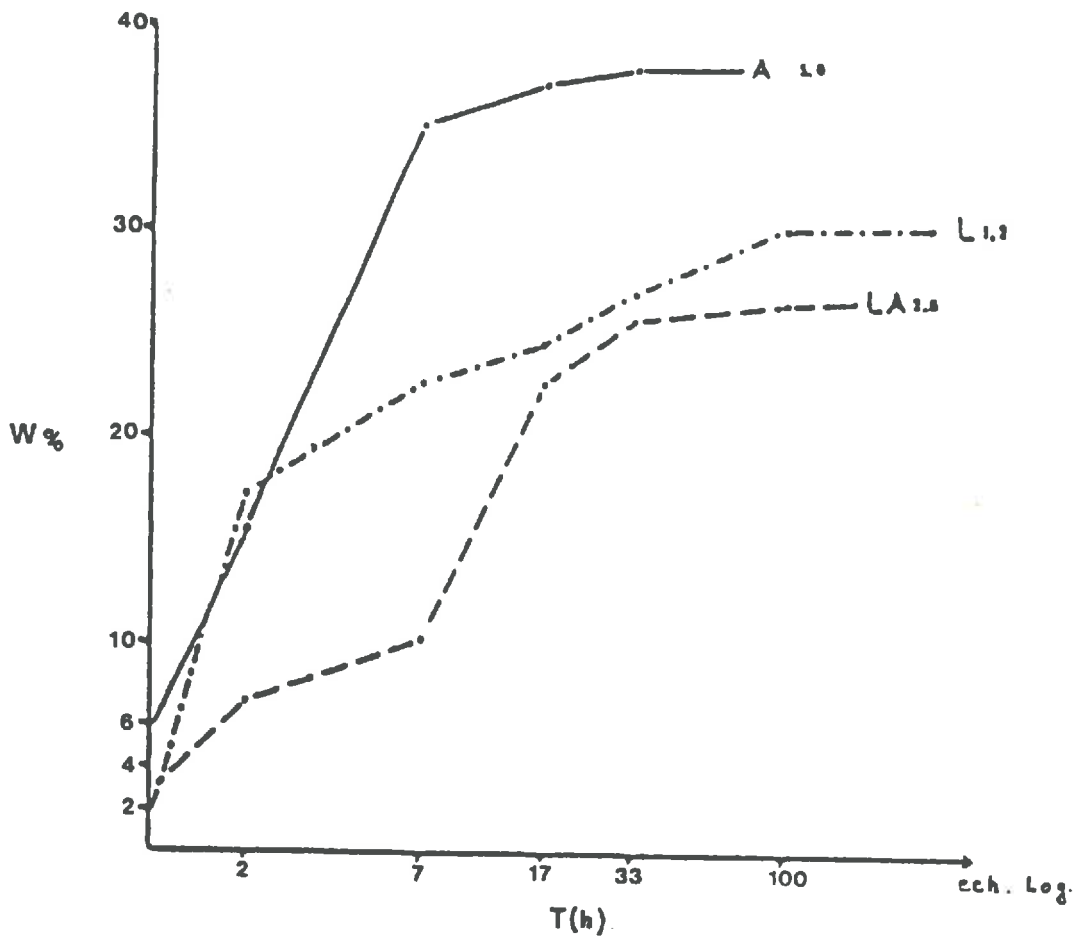


Figure 14 Résultats antérieurs; cinétique d'humectation de massifs remaniés (De Leon, 1987).

de préparation. Il semblerait donc qu'il existe un résidu de porosité structurale sur les matériaux naturels qui influe sur l'augmentation et sur la variabilité de l'infiltrabilité.

IV-2. Résultats de la fissuration.

Les effondrements des parois et les frottements à la base du massif influençant fortement les résultats de l'épaisseur des fissures formées, l'analyse ne portera que sur les résultats de la longueur surfacique des fissures (I.F. en cm/cm^2).

IV-2.1. Fissuration au cours de l'apport d'eau sur les matériaux naturels.

a) Fissuration horizontale.

La photographie 2 montre qu'il apparaît une fissuration horizontale et sub-horizontale importante sur les matériaux argileux. Celle-ci se développe dans la zone de cisaillement entre la couche humide et la couche sèche sous jacente.

Pour le matériau limono-argileux, cette fissuration est visible mais peu marquée alors que sur le matériau limoneux cette zone de cisaillement n'apparaît pas.

b) Fissuration de la face supérieure (cf. figure 15).

Dans le cas du matériau limono-argileux, aucune fissuration n'est observée sur la face supérieure. Par contre, une fissuration non négligeable apparaît sur les échantillons limoneux et argileux.

Pour le matériau limoneux, il s'agit d'une fissuration fine (la totalité des fissures ont une épaisseur inférieure à 0,5 mm), localisée à la périphérie des massifs (cf. photo 4). L'étude de la cinétique de cette fissuration par la comparaison des intensités de fissuration (I.F.) obtenues à chaque dose permet difficilement d'expliquer son origine et son évolution. En effet, cette intensité ne croît ni avec l'humidité de surface (comparaison des doses de 14 et 17 mm), ni avec le temps de contact de la couche de surface avec le film d'eau, ce qui aurait pu expliquer l'effet de l'eau sur l'apparition de cette fissuration.

Dans le cas du matériau argileux, les fissures sont à dominante radiale (cf. photo 3) et leur épaisseur est plus importante. Pour ce matériau l'intensité de fissuration augmente avec la quantité d'eau apportée. Ces deux fissurations ne sont pas négligeables. Leurs intensités maximales (I.F. $\simeq 1 \text{ cm}/\text{cm}^2$) sont comparables à celles observées sur la face inférieure du matériau argileux.

c) Fissuration de la face inférieure (cf. figure 17)

Là encore, la fissuration n'apparaît que sur les matériaux limoneux et argileux. Pour ces deux matériaux, les quantités d'eau apportées correspondant à l'apparition de cette fissuration sur la face inférieure sont élevées (17 et 20 mm). Ce à quoi, on pouvait s'attendre pour le sol limoneux pour lequel la fissuration n'apparaît que lors de la saturation du massif. En effet, pour ce matériau, le gonflement est faible et limité au domaine saturé.

Par contre, il est difficile d'expliquer l'absence de fissuration sur les massifs argileux, pour des quantités d'eau plus faibles, notamment la dose de 14 mm. En effet, l'humidité observée à la base du massif de cette dernière modalité est comparable à l'humidité du massif de la modalité 5 mm, à la redistribution.

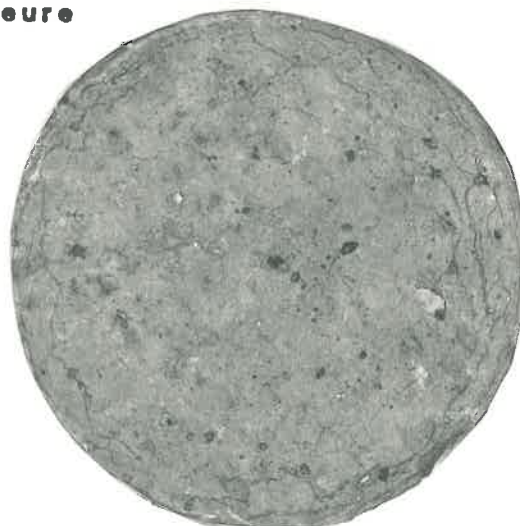
Photo2 Fissuration par cisaillement
sur les massifs argileux



Photo3 Fissuration sur la face supérieure
des massifs argileux
après l'humectation



Photo4 Fissuration sur la face supérieure
des massifs limoneux
après l'humectation



Or, ce dernier présente une fissuration importante sur la face inférieure. Egalement, les résultats des travaux antérieurs (DE LEON, 1987) montraient que la fissuration sur un matériau de même texture mais remanié pouvait apparaître pour des humidités très faibles ($\ll 10\%$). Cependant, la comparaison avec ces résultats ne nous permet pas de conclure quant aux effets du dispositif et du mode de préparation sur cette absence de fissuration à des doses plus faibles.

d) conclusion

Dans cette phase de réhumectation sensu-stricto, les fissurations par cisaillement au niveau du front d'humectation et par traction à l'avant de ce front sont donc en accord avec les hypothèses mécaniques.

Cependant, les résultats de la fissuration observée sur la face supérieure qui est en compression, restent contradictoires. Pour interpréter celle-ci, on est conduit à formuler les hypothèses suivantes :

- Les fissures périphériques et tangentielles sont dues à l'effondrement des parois du massif sous l'effet de leur propre poids. Ceci ne relève pas de notre étude, mais doit être pris en compte car sur le terrain ces phénomènes existent et contribuent fortement à la division des mottes de surface.

- Dans le cas des échantillons limoneux, la dégradation de la partie superficielle au contact avec l'eau entraîne progressivement l'individualisation de cette couche de surface, peu épaisse (1 à 2 mm) où apparaît une fissuration fine et peu profonde.

L'observation de la face en contact avec l'eau nous montre donc que la fissuration peut prendre des formes différentes et relève d'une multiplicité de phénomènes.

Quant aux effondrements observés sur les échantillons naturels, ils démontrent que la modélisation de la fissuration sur ce type de matériau ne doit pas négliger l'effet du poids.

IV-2.2. Fissuration au cours de la redistribution.

a) Fissuration de la face supérieure (cf. figure 16).

Dans le cas du matériau limoneux, à l'exception de la fissuration correspondant à la dose de 14 mm, la totalité des fissures formées lors de l'humectation disparaît durant la redistribution.

Dans le cas du matériau argileux, de nombreuses fissures se forment lors du retrait (Segment (1)), notamment pour la dose de 5 mm pour laquelle la totalité des fissures observées sur la face supérieure apparaît lors de cette phase (cf. photo 5). L'intensité de cette fissuration est variable et diminue fortement avec la quantité d'eau apportée (cf. photo 5). Ces résultats confirment ceux obtenus sur le terrain (CARDON-DUBOIS, 1985). Egalement, il apparaît une relation linéaire (aux erreurs de mesure de la longueur de la fissuration) entre l'intensité de la fissuration et la quantité d'eau apportée. Ceci est en accord avec le résultat de la relation précédemment citée ($l = R_T/R_c \cdot e$) si l'on admet que l'épaisseur (e) de la couche en dessèchement est proportionnelle à la quantité d'eau apportée et que la taille des éléments structuraux (l) est proportionnelle à la quantité de fissures formées.

En ce qui concerne le matériau limono-argileux, l'intensité de la fissuration est moins importante que pour le matériau argileux. Mais les variations de ces intensités en fonction des quantités d'eau apportées ont la même forme.

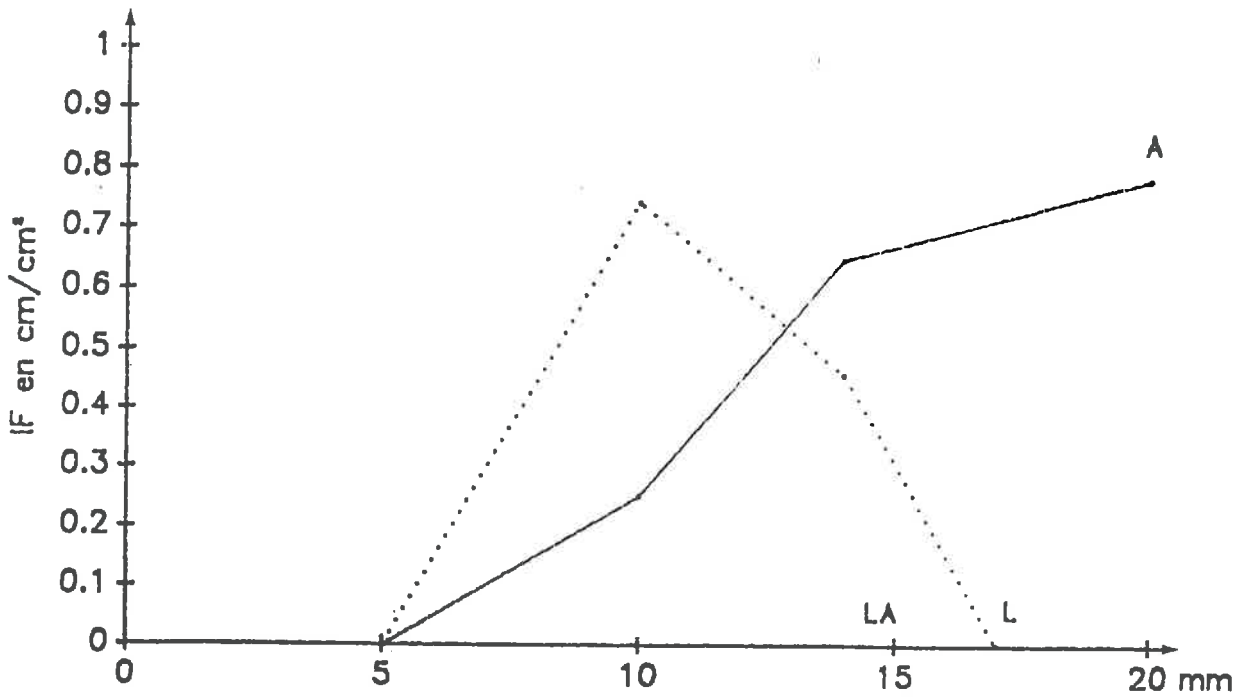


Figure 15. Fissuration sur la face supérieure à l'humectation.

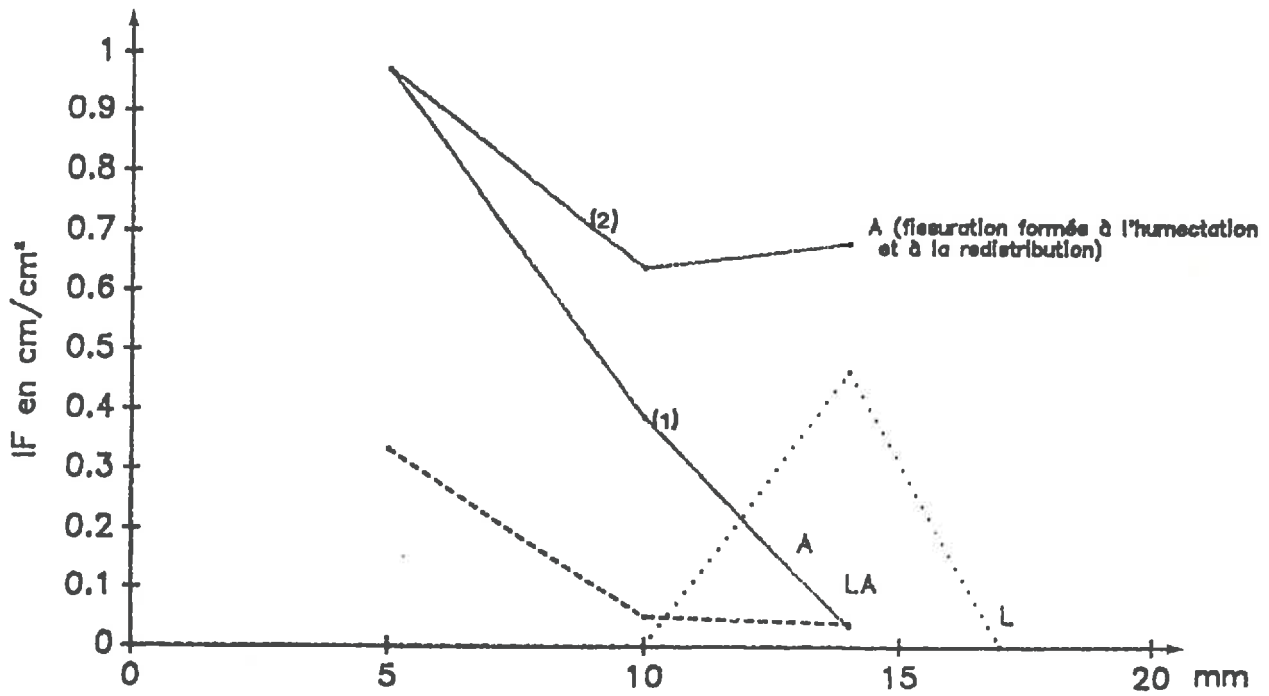


Figure 16. Fissuration sur la face supérieure à la redistribution.

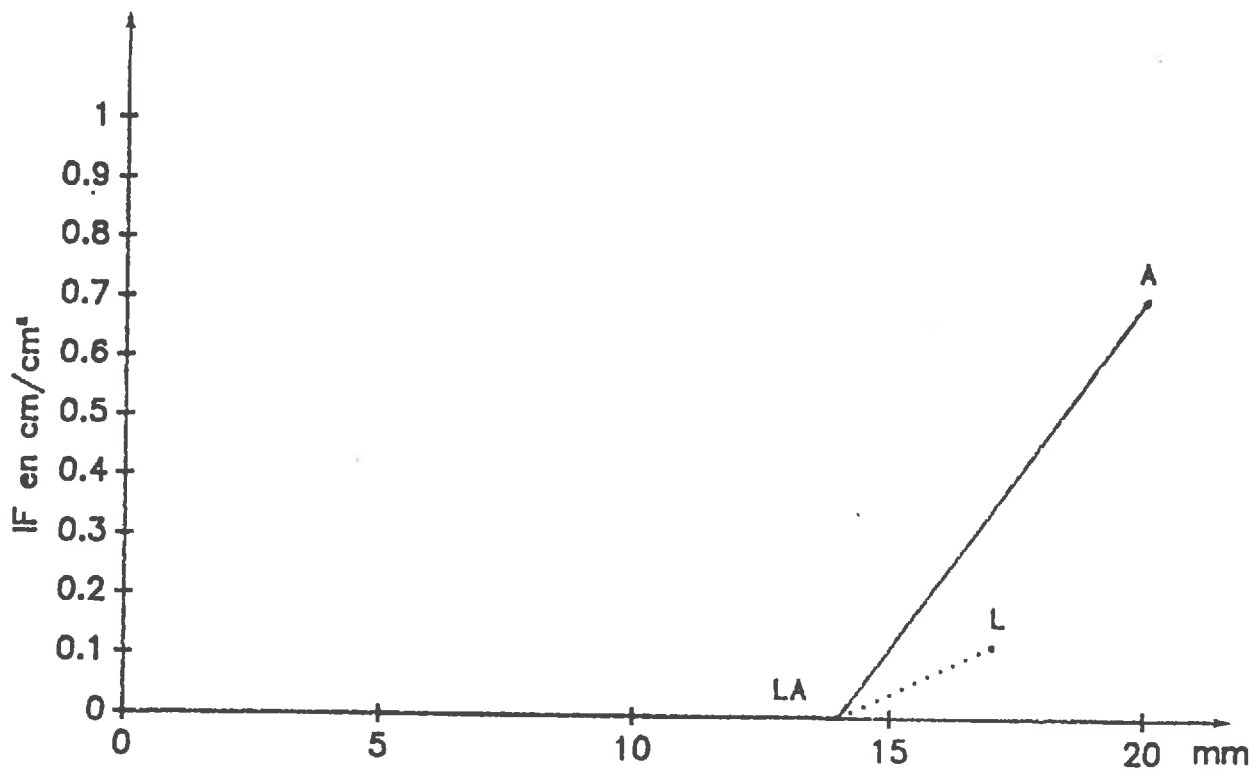


Figure 17 Fissuration sur la face inférieure à l'humectation.

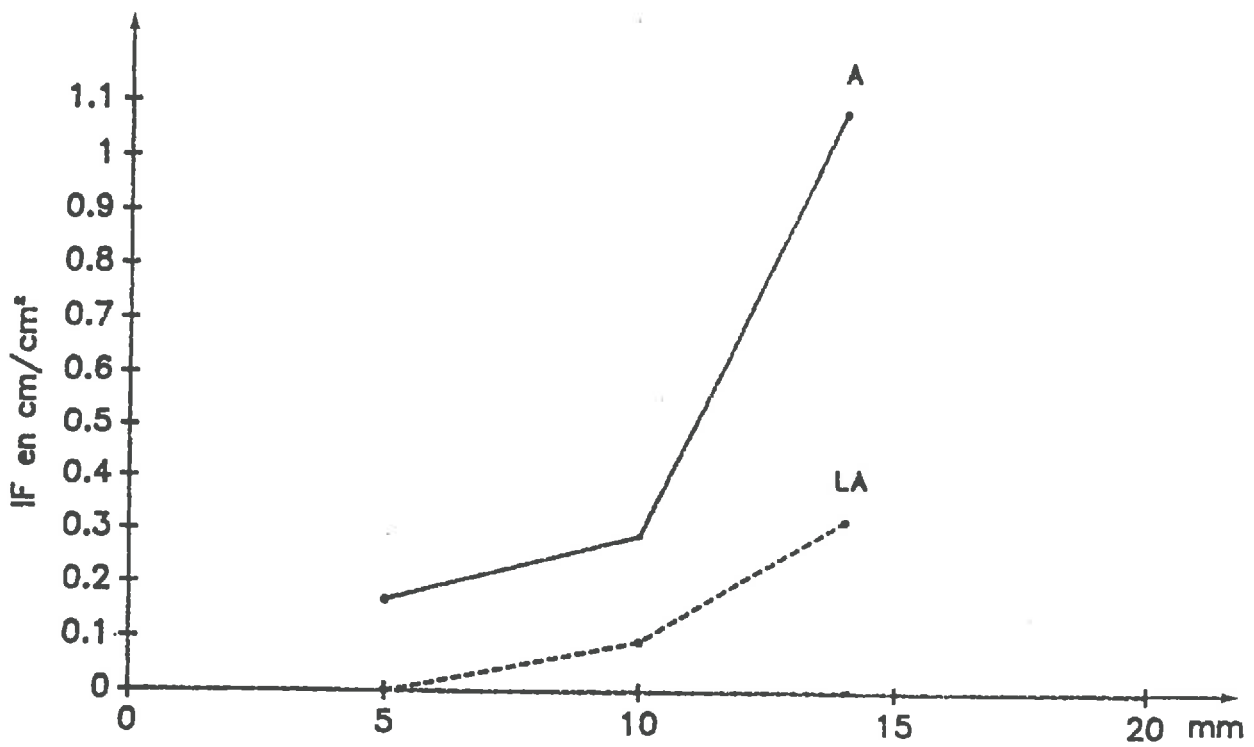


Figure 18 Fissuration sur la face inférieure à la redistribution.

b) Fissuration de la face inférieure (cf. figure 18)

La fissuration obtenue sur cette face est comparable du point de vue de son intensité à celle observée sur la face supérieure. Ces deux types de fissuration se distinguent essentiellement par leur morphologie. Les fissures de la face inférieure sont généralement plus longues, rectilignes et présentent un contour bien délimité (cf. photo 5).

Dans le cas du matériau limoneux, il n'y a pas d'évolution de la fissuration entre la phase d'humectation et la redistribution.

Au contraire, pour le matériau argileux une fissuration intense apparaît sur cette face. Celle-ci apparaît pour des humidités très faibles ($\approx 7\%$) et augmente très rapidement avec la quantité d'eau apportée. A ce sujet, il faut rappeler que pour le massif correspondant à la dose de 5 mm, une fissuration importante apparaît pour une humidité très faible à la base du massif alors qu'aucune fissuration n'existe à la base du massif de la modalité 14 mm, à l'humectation, pour des humidités plus grandes.

Cette différence dans l'apparition de la fissuration peut s'expliquer à partir de deux mécanismes :

- Dans le cas de la modalité 5 mm, à la redistribution, la couche inférieure, en traction, est totalement réhumectée. Il en résulte une diminution importante de la résistance en traction de cette couche. Alors que pour la modalité 14 mm, il persiste une couche sèche dont la résistance en traction reste élevée.
- Lors de la réhumectation, les résistances au gonflement sont plus importantes du fait de l'existence d'un joint de graisse à la base du massif.

Contrairement au cas de la fissuration de la face supérieure, il n'apparaît pas de relation linéaire entre l'intensité de la fissuration et la quantité d'eau apportée. Ainsi, l'accroissement de l'intensité de fissuration est d'autant plus grand que la quantité d'eau apportée est élevée. Cet effet peut s'interpréter par les deux mécanismes suivants :

- La couche sèche, de moins en moins épaisse, subit une contrainte de traction de plus en plus forte, à mesure que la couche sus-jacente gonfle et se réhumecte.
- La couche sèche se réhumecte et sa résistance à la traction diminue fortement.

La comparaison des intensités de fissuration correspondant aux doses de 5 et 10 mm illustre le premier de ces mécanismes. Pour la première dose, l'épaisseur de la couche sèche est d'environ 2 cm alors qu'elle n'est plus que de 1 cm dans le cas du massif de la modalité 10 mm.

L'augmentation plus importante de l'intensité de fissuration entre les doses 10 et 14 mm illustre la succession des deux mécanismes.

Dans le cas du matériau limono-argileux, les résultats sont similaires. Seules les intensités de la fissuration sont différentes. Les intensités plus faibles observées sur ces massifs sont à mettre en relation avec les propriétés de gonflement du matériau (gonflement potentiel plus faible).

IV-2.3. Influence de l'état initial des échantillons sur la fissuration.

La comparaison des résultats des échantillons naturels et remaniés est présentée par les figures 19 et 20.

L'analyse ne porte que sur les matériaux limono-argileux et argileux puisque aucune fissuration n'apparaît sur les massifs limoneux.

Photo 5 Fissuration sur les massifs argileux naturels après la redistribution

Face supérieure

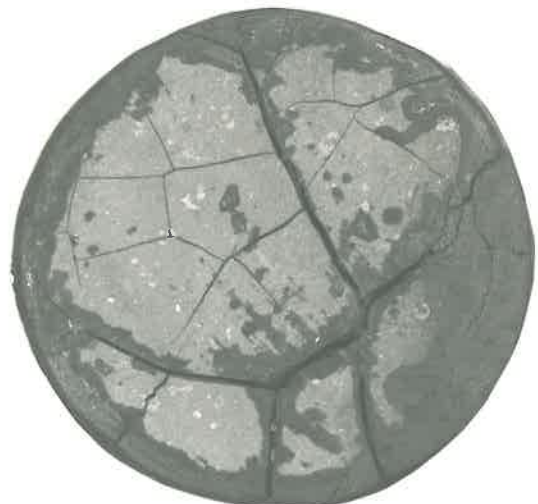
Face inférieure



5 mm



10 mm



14 mm

a) Fissuration au cours de l'apport d'eau.

Contrairement aux échantillons naturels, aucune fissure n'apparaît sur la face supérieure des échantillons argileux et limono-argileux remaniés. Ceci laisse à penser que l'hétérogénéité mécanique évoquée lors de l'étude des cinétiques d'humectation pourrait jouer un rôle dans l'apparition de ces fissures ou qu'il reste des "souvenirs" de fissures qui réapparaissent lors du contact avec l'eau.

Sur la face inférieure, également, aucune fissure n'existe. Mais ceci peut être imputé à la faible quantité d'eau apportée (10 mm). Pour ces massifs, il reste une couche sèche ($\bar{h} \approx 5\%$) trop épaisse.

b) Fissuration au cours de la redistribution.

* Fissuration sur la face supérieure (cf. figure 19).

Les résultats de l'intensité de la fissuration, apparue lors de cette phase, sur les matériaux remaniés, sont tout à fait comparables à ceux obtenus sur les échantillons naturels.

Cependant, il faut remarquer que ces résultats comparables cachent des différences de comportement que révélaient les cinétiques d'humectation et l'étude des profils hydriques. Ainsi, dans le cas des massifs argileux remaniés :

- L'épaisseur de la couche humectée est plus faible du fait d'une plus grande quantité d'eau retenue dans les couches supérieures.

- La diminution de la teneur en eau de surface durant la phase de redistribution est plus grande que pour les échantillons naturels.

- La quantité d'eau redistribuée dans les couches initialement sèches est plus élevée et de ce fait le gonflement plus important de ces couches induit des contraintes de traction plus grandes dans la couche en dessèchement.

On retrouve donc ici les mécanismes déjà décrits qui agissent en interaction sur la fissuration au retrait et qui rendent difficile la prévision de l'intensité de la fissuration à partir d'un paramètre (e : épaisseur de la couche en dessèchement).

* Fissuration sur la face inférieure.

L'intensité de la fissuration obtenue sur les massifs remaniés est plus grande que sur les massifs naturels. Ceci peut s'expliquer par la différence de comportement des matériaux vis-à-vis des contraintes hydriques.

Pour les massifs remaniés, la quantité d'eau qui se redistribue dans les couches inférieures est plus grande. Dans ce cas, il n'existe plus de couche sèche et l'humidité élevée à la base du massif (17,6 %) contribue fortement à la diminution de la résistance en traction de la couche inférieure (GUERIF, 1988).

Pour les massifs naturels, il faut également souligner que le gradient d'organisation lié au compactage peut influencer la répartition de l'eau entre les différentes couches de sol, et de ce fait peut modifier le rapport des contraintes mécaniques entre ces différentes couches.

Si l'on compare les résultats de la fissuration obtenus sur nos massifs argileux remaniés avec ceux obtenus sur le même type de préparation mais avec un dispositif différent (CARDON-DUBOIS, 1985), on remarque que pour une même quantité d'eau apportée ($\approx 17\%$ d'humidité) les intensités de la fissuration

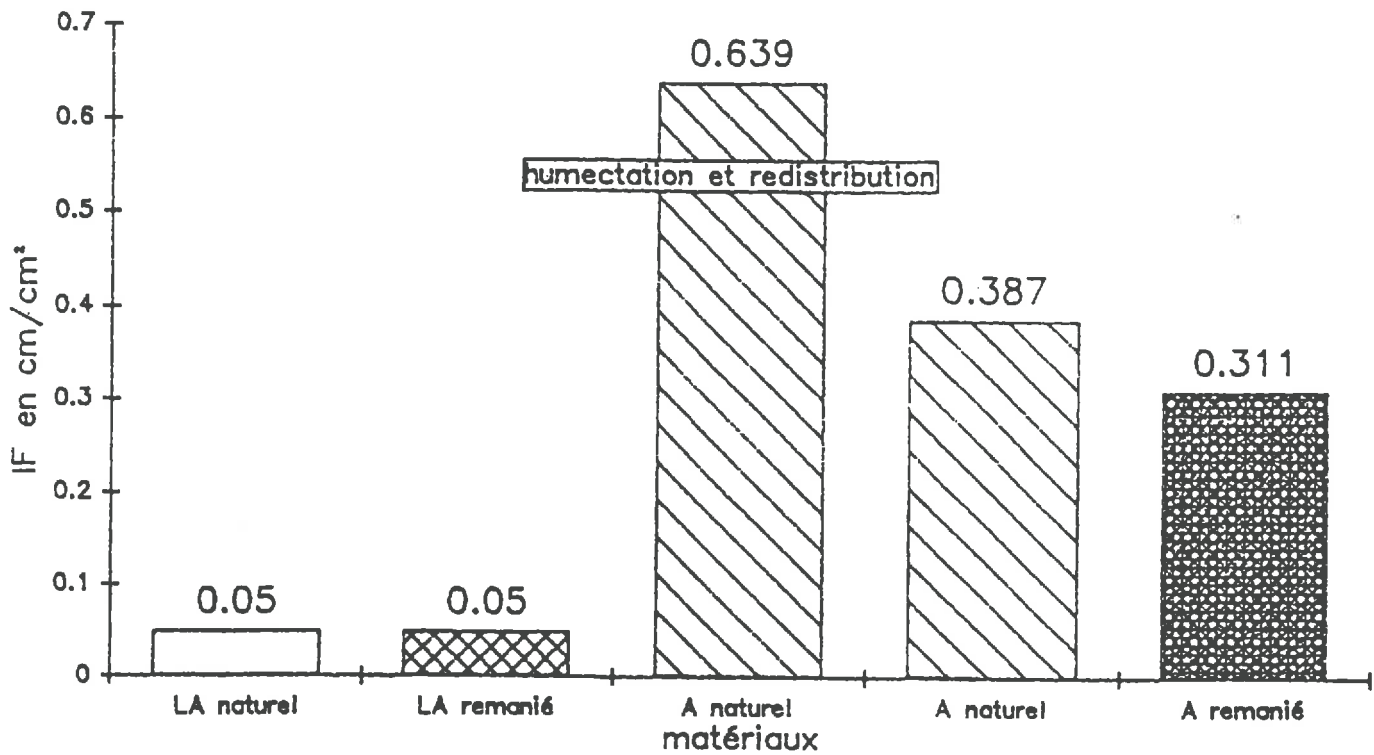


Figure 19: Effet du mode de préparation sur la fissuration de la face supérieure (Fissures formées à la redistribution).

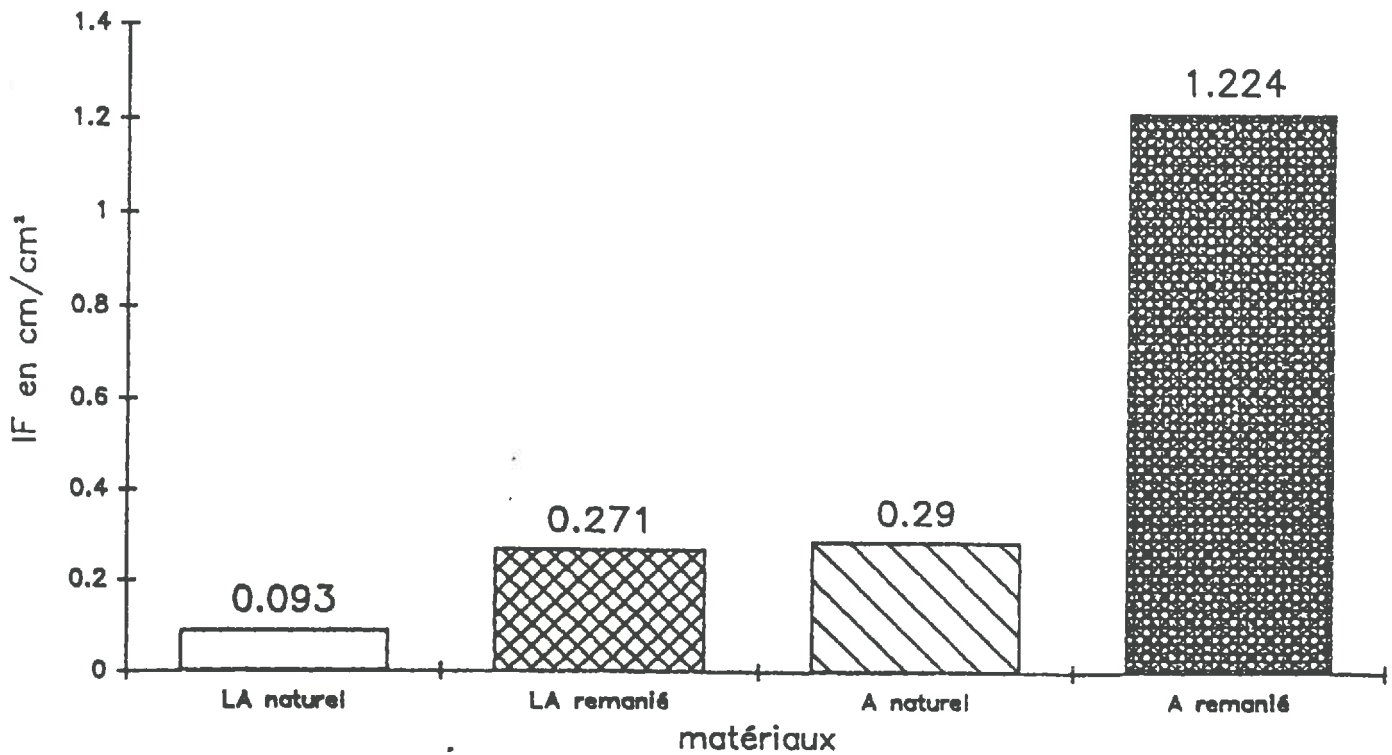


Figure 20: Effet du mode de préparation sur la fissuration de la face inférieure (Fissures formées à la redistribution).

sont différentes. L'intensité de la fissuration obtenue avec le dispositif antérieur (I.F. $\approx 0,8 \text{ cm/cm}^2$) est inférieure à celle observée sur nos massifs. Cependant, ceci ne nous permet pas de conclure quant à un effet éventuel du dispositif sur le résultat de la fissuration. En effet, dans notre cas, lors de la redistribution, le joint de graisse à la base du massif n'existe plus et le cylindre de terre ne repose plus sur la grille perforée.

V- DISCUSSION.

Ces résultats ne restent valables que pour nos conditions expérimentales dont on a vu qu'elles jouaient un rôle important sur l'apparition de la fissuration. Le manque de répétitions nous empêche de généraliser ces résultats à l'ensemble des matériaux et pour des conditions les plus diverses.

Toutefois, la comparaison entre les échantillons naturels et remaniés nous permet d'affirmer qu'il existe une fissuration sur ces premiers et que celle-ci n'est pas de moindre importance. Ainsi, les résultats de la fissuration, observée sur la face supérieure après la redistribution, sont comparables à ceux obtenus sur les matériaux remaniés. Quant à la fissuration de la face inférieure, celle-ci est moins importante que dans le cas des matériaux remaniés mais elle reste relativement élevée.

Egalement, le sens de variation des intensités de la fissuration obtenues sur les faces supérieures au retrait et les faces inférieures des matériaux limono-argileux et argileux, montre que le mécanisme de la fissuration relatif à chacune de ces faces peut s'expliquer, en partie, à partir des hypothèses mécaniques énoncées. Néanmoins, l'apparition de la fissuration à l'humectation sur la face supérieure pour les matériaux limoneux et argileux naturels restent contradictoires avec ces hypothèses. Ceci met en évidence la multiplicité des paramètres à prendre en compte pour la prévision de la morphologie de la maille fissurale, notamment les rôles :

- des résistances mécaniques liées au dispositif expérimental,
- des contraintes de compression exercées par les couches qui s'humectent,
- de la résistance au cisaillement qui n'est pas négligeable dans le cas d'un front d'humectation non plan (imbrication des parties sèches et humides),
- des variations de la résistance en traction en relation avec les variations des humidités.

L'étude de ces paramètres restera très complexe, d'une part, ils interagissent et leurs effets ne sont pas dans la plus part des cas additionnels. D'autre part, les valeurs et les variations de ces paramètres dépendent de l'état initial du matériau. Ainsi, la résistance en traction est fortement influencée par les conditions dans lesquelles a été effectué le compactage (GUERIF, 1988).

L'observation de la face en contact avec l'eau a révélé quant à elle, l'existence d'une fissuration dont la morphologie est variable suivant la cause qui l'a produite (fissuration fine apparue dans une couche de surface déformée, fissuration grossière qui pourrait provenir d'une fissuration résiduelle après le compactage ou effondrement des parois du massif). Dans le cadre de ce travail, cette fissuration à l'échelle d'une couche (inférieure au cm) n'a pas d'intérêt pour la connaissance du mécanisme de la fissuration. Cependant, ces phénomènes ont toutes les chances d'intervenir dans les mécanismes naturels de la

dégradation des mottes compactées sur le terrain. De ce fait, ils ne doivent pas être négligés, surtout sur le matériau limoneux où ils sont la seule source de fissuration en surface, à l'humectation.

L'ensemble de ces résultats fait apparaître que si l'on veut quantifier la fissuration ou tout au moins connaître l'influence de chacun des facteurs, il sera nécessaire :

- de travailler dans des conditions mécaniques standard à la fois au niveau du contact avec le support et à la périphérie du cylindre de terre,

- de travailler avec un état initial de référence des massifs. Ainsi le remaniement des massifs permet d'accroître leur homogénéité et donc de diminuer la variabilité de leur comportement vis-à-vis des contraintes hydriques (cf. cinétiques d'humectation des massifs remaniés),

- d'obtenir des profils caractéristiques (front d'humectation plan) d'une grande précision afin de faire apparaître les variations de gradient au sein des différentes couches de sol, notamment au niveau de la surface (quantification du retrait en surface) et près du front d'humectation (évaluation de l'épaisseur de la couche en dessèchement).

Mais compte tenu de la variabilité liée à l'état initial et à la fissuration qui se développe dans le massif, il sera difficile d'obtenir de tels profils. Egalement, ceci suppose des mesures très précises de masses et laisse entrevoir des difficultés matérielles importantes (prélèvements de couches de très faible épaisseur, prélèvement dans les couches d'apparence sèches).

Néanmoins, cette étude a permis de montrer que l'on pouvait travailler sur des échantillons non remaniés sans que les résultats en soient fondamentalement modifiés, et, qu'il était possible de comparer des profils hydriques en réhumectation et à la redistribution sur deux massifs différents.

CONCLUSION.

Cette étude a permis de vérifier l'existence de la fissuration sur trois matériaux naturels de textures différentes, et a laissé entrevoir la possibilité de décrire le mécanisme de cette fissuration à partir d'un modèle qui prendrait en compte, les contraintes de traction dont l'origine est à mettre en relation avec les gradients hydriques intenses apparaissant dans le massif de terre.

Mais l'ensemble de ces résultats montre bien la difficulté d'établir un modèle quantitatif de l'évolution structurale par fissuration.

Ainsi, l'existence et le développement de fissures au sein d'un matériau dépend autant de ses caractéristiques mécaniques (résistance en traction, résistance au cisaillement) que des conditions dans lesquelles lui sont appliquées les contraintes mécaniques et hydriques lors de la phase de réhumectation.

Par conséquent, l'étude des facteurs influençant la fissuration ne pourra se faire que dans des conditions standard. A ce sujet, cette étude a démontré l'intérêt du matériau argileux remanié pour lequel la réhumectation par la face supérieure présente le moins de difficultés et les effets des contraintes sont très marquées.

Egalement, après cette première étape, il sera nécessaire de contrôler la stabilité du modèle et son extension à d'autres matériaux par une approche statistique qui prendrait en compte les probabilités des facteurs et leur quantification dans des conditions diverses.

L'application d'un tel modèle aux conditions naturelles ne permettra que très approximativement de prévoir quelle structure va acquérir un matériau (pour un état initial donné) du fait du caractère aléatoire de l'apparition des fissures dès qu'apparaît une hétérogénéité (Matière Organique ou éléments grossiers) dans ce matériau. Mais la description du système fissural permettra incontestablement d'améliorer nos connaissances sur les transferts d'eau dans les sols gonflants, ces derniers étant fortement influencés par la morphologie fissurale.

BIBLIOGRAPHIE

CARDON-DUBOIS F., 1985 - Fissuration à l'humectation d'un sol argileux. Mémoire de Fin d'Etudes, ENITA, Dijon, 38 p.

DE LEON F., 1987 - Fissuration à l'humectation des sols : étude expérimentale sur échantillons remaniés. Mémoire INA-PG, 20 p.

DINH T.L., 1974 - Etude des traitements mixtes par l'essai du retrait thermique empêché (essai de fissuration). Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées, 78, 103-116.

FIES J.C., 1982 - Etude des écoulements en milieu saturé en relation avec la morphologie de l'espace poral du sol. Rapport du contrat D.G.R.S.T., Maîtrise de l'eau dans les bassins méditerranéens 79-7-0075, 32 p.

GUERIF J., 1988 - Mécanisme du compactage. C.R. Acad. Agr. Fr., 74(1), 29-42.

HALLAIRE V., 1985 - Méthode de mesure du retrait vertical d'un sol argileux. In Soil Compaction and Regeneration, BALKEMA Pub.

MANICHON H., 1982 - Influence des systèmes de cultures sur le profil cultural : élaboration d'une méthode de diagnostic basée sur l'observation morphologique. Thèse INA-PG, 213 p.

MONNIER G., STENGEL P., FIES J.C., 1973 - Une méthode de mesure de la densité apparente de petits agglomérats terreux. Application à l'analyse des systèmes de porosité du sol. Ann. Agron. 24(5), 533-545.

PINOCHET X., 1981 - Prévision du retrait gonflement d'agrégats de sol. Relation avec le potentiel de l'eau. Mémoire de fin d'Etudes, ENITA, Dijon.

STENGEL P., 1983 - Simplification du travail du sol en rotation céréalière : conséquences physiques. Colloque ONIC, Rotations Céréalières Intensives, 37 p.

STENGEL P. et BOURLET M., 1987 - Fissuration d'un sol argileux gonflant après compactage : effet de l'humectation. In Soil Compaction and Regeneration. BALKEMA Pub., 95-110.

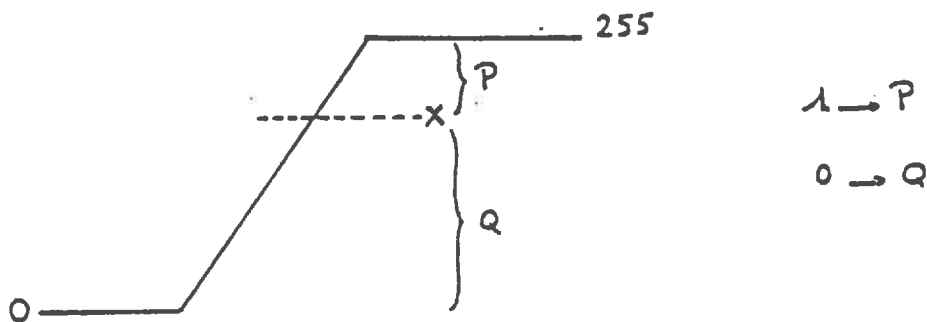
STENGEL P., 1988 - Etude expérimentale de la fissuration au cours du dessèchement et de l'humectation. 13 p. Doc. non diffusé.

ANNEXE 1 : ANALYSE D'IMAGE

I- PREPARATION DE L'IMAGE : DEFINITION DES FISSURES

1/ Le seuillage

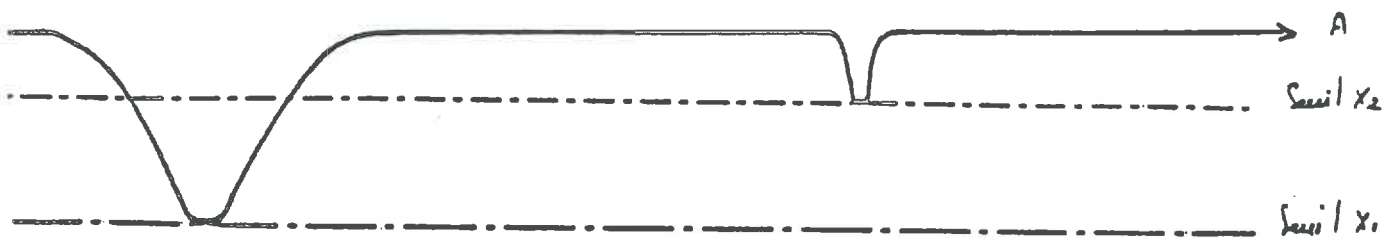
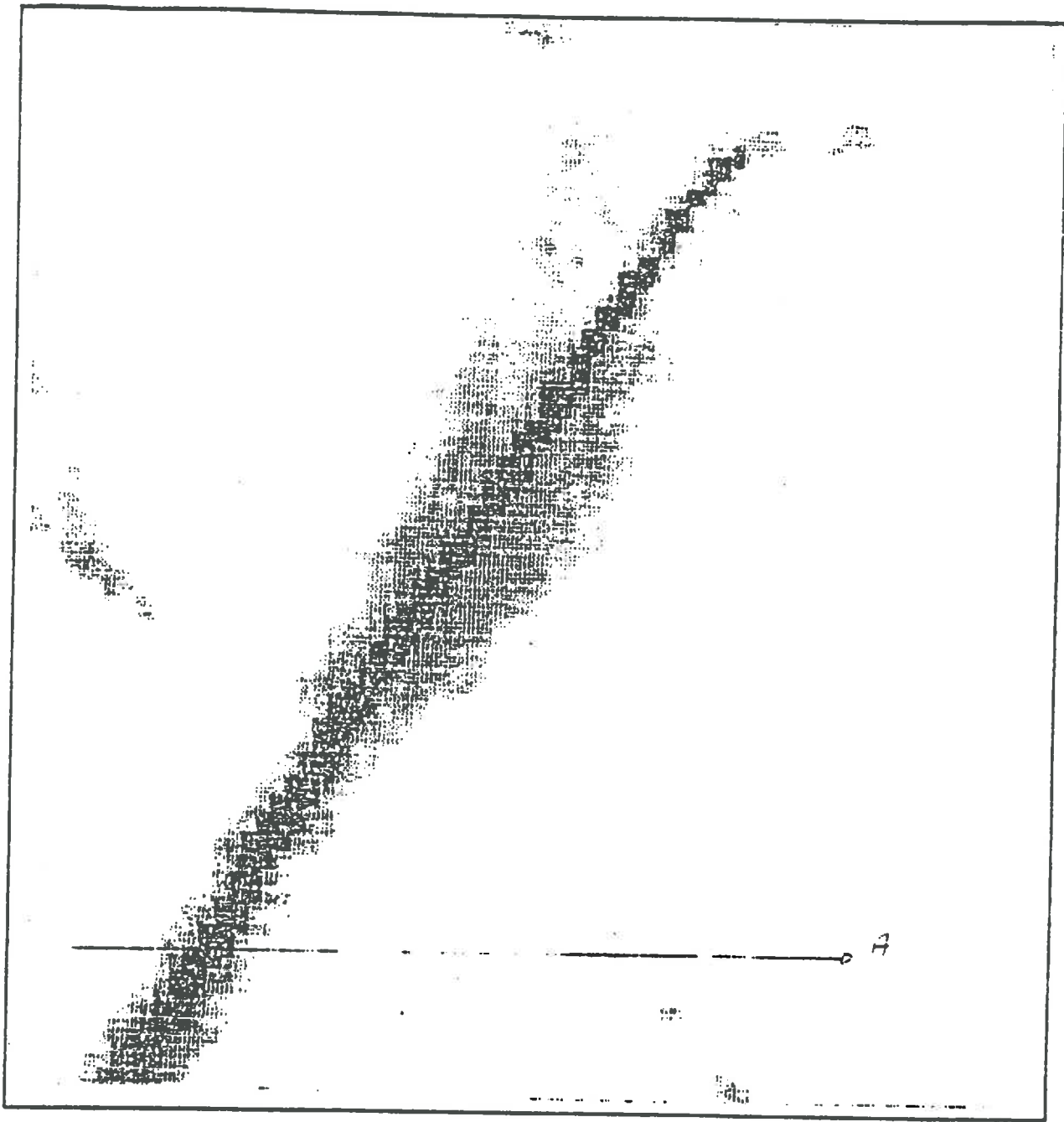
Il consiste à délimiter les frontières des fissures en faisant varier un seuil X sur la gamme des niveaux de gris de 0 à 255. Le seuil X est la borne inférieure des valeurs de gris correspondant aux fissures. La valeur 1 est affectée à tous les pixels dont l'intensité de gris est supérieure à X . La valeur 0 est affectée à tous les autres pixels.



La difficulté du seuillage est due à deux choses :

- les fissures ne sont pas définies par un niveau de gris, mais par une forme. Elles n'ont pas toutes la même intensité de gris.
- les bords des fissures sont souvent mal définis. Il existe une zone de transition avec un gradient de gris entre le corps de la fissure et le fond de l'image.

Il est dû, d'une part, aux ombres portées et à l'humidité lors de la prise de vues, d'autre part aux effets de bordure inhérents aux traitements photographiques et à l'acquisition par la caméra vidéo (balayage).



est du seuillage X_2

est du seuillage avec X_c

- valeur 0
- valeur 1

Certaines fissures fines ont une intensité de gris identique soit à celle de la zone de transition des fissures larges, soit à certaines zones sombres du fond de l'image. Ainsi l'abaissement du seuil X (à une valeur X_2 par exemple sur le schéma) de façon à comptabiliser les fissures fines pour ne pas perdre de l'information équivaut à comptabiliser la zone de transition dans la surface des fissures. La porosité fissurale s'en trouve d'autant surestimée (cf. Schéma ci-contre). Pour éviter cela, nous avons recours à une deuxième forme de seuillage.

2/ Le seuillage "chapeau haut de forme"

C'est une opération morphologique qui consiste à augmenter l'intensité de gris des fissures fines tout en réduisant l'amplitude de leur zone de transition, et à supprimer dans le même temps les fissures les plus larges. Deux phases :

- Un seuillage avec le seuil X_1 qui délimite les frontières des grosses fissures.
- Un seuillage X' précédé d'un traitement "chapeau haut de forme" pour délimiter les frontières des fissures fines.

En additionnant ensuite les deux images, on obtient une image binaire seuillée où la délimitation des frontières de toutes les fissures n'a pas donné lieu à une mauvaise estimation de la géométrie des fissures.

II- ANALYSE MORPHOLOGIQUE DES FISSURES : QUANTIFICATION

L'image seuillée est une image binaire (2 valeurs 0 ou 1). Une série d'opérations est effectuée.

- a) Evaluation de la surface totale du massif : Cette opération consiste à compter le nombre de pixels dans une zone préalablement déterminée à l'aide d'un marqueur neutre.
- b) Evaluation de la surface des fissures I : L'analyseur somme la valeur de tous les pixels présents dans la même zone, ce qui revient à compter les pixels valant 1.

La porosité fissurale est le rapport $\frac{I}{S} = n_F$

3/ Evaluation de la longueur des fissures

Deux méthodes possibles :

- Squelettisation

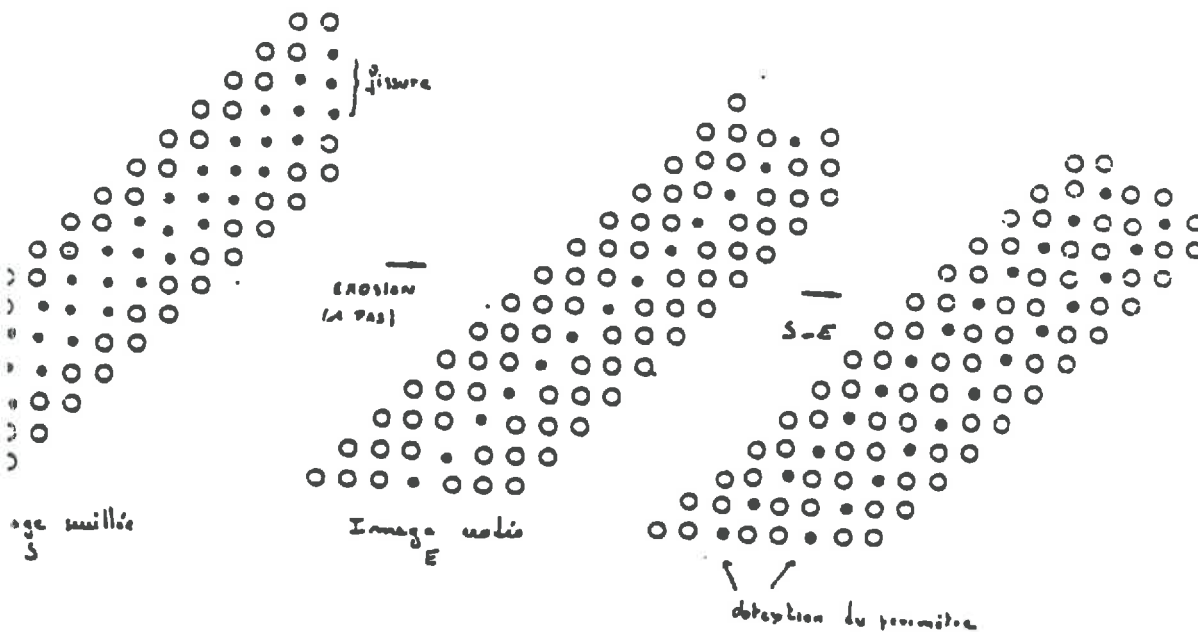
Elle consiste à réduire toutes les fissures à un trait d'épaisseur un pixel.

Il suffit d'évaluer ensuite le nombre de pixels valant 1 pour obtenir la longueur totale.

- Calcul du périmètre

Le calcul du périmètre peut également constituer une évaluation de la longueur des fissures. On suppose pour cela que la largeur des fissures est négligeable devant leur longueur.

Une érosion est effectuée sur l'image seuillée. L'érosion consiste à réduire l'épaisseur des fissures d'un pixel de chaque côté. L'image érodée est alors soustraite à l'image seuillée. On obtient ainsi sur une image tous les pixels qui ont disparu à l'érosion, c'est-à-dire le périmètre des fissures.



Le périmètre s'obtient en sommant tous les pixels de la surface totale.

Le calcul du périmètre par les deux méthodes différentes donne les mêmes résultats. Nous avons décidé d'évaluer la longueur par le calcul du périmètre. Ce dernier est en effet plus rapide.

4/ Granulométrie des fissures

Elle est obtenue en évaluant successivement les périmètres des fissures érodées à chaque étape de deux pixels en largeur (deux pixels correspondent à 0,5 mm dans notre cas).

Organigramme des mesures par analyse d'image

- 1/ Extraction des fissures de grande épaisseur :
 - Seuillage sur un niveau de gris → image I

- 2/ Extraction des fissures fines :
 - Ouverture (dilatation x érosion) sur l'image 8 bits
 - Transformation Chapeau Haut de Forme
(érosion x 2 dilatations x 1 érosion - suivie d'une soustraction de l'image d'origine)
 - Seuillage → image II

- 3/ Elimination des bruits
 - des deux images I et II → image III
 - Elimination des points isolés
 - Squelettisation
 - Ebarbulage (élimination des extrémités du squelette par pas de 1 pixel) 1 ou 2 suivant dimensions des objets à éliminer
 - Elimination des points isolés
 - Reconstruction de l'image III : tous les objets restant retrouvent la forme initiale conservée dans l'image III
 - Sélection selon la surface : élimination de tous les objets d'une surface inférieure à un seuil donné (entre 10 et 20 pixels pour les images traitées ici)

- 4/ Mesures :
 - Longueur de fissures :
 - Mesures de la longueur du périmètre, divisé par deux
 - Porosité :
 - Rapport du nombre de pixels des fissures où nombre de pixels du marqueur (limitation de l'image étudiée)
 - Granulométrie des fissures :
 - Erosion successive par pas d'un pixel suivie de mesures de longueur et de porosité.

Annexe 2 : Calcul de la quantité d'eau contenue
dans une couche de sol

*** Masse de solide**

Soit:

- e l'épaisseur de la couche considérée.
- Δe l'accroissement de l'épaisseur de la couche après la réhumectation.
- m_s la masse de solide contenue dans la couche avant la réhumectation.
- m_s' la masse de solide contenue dans la couche après la réhumectation.

$$m_s' = m_s / (1 + \Delta e/e) \quad (1)$$

Soit:

- M_{sa} la masse du massif sec à l'air.
- W_0 l'humidité initiale du massif sec à l'air.
- E l'épaisseur du massif avant la réhumectation.

Avec l'hypothèse (1): la masse volumique du massif est homogène.

$$m_s = (M_{sa} / (1 + W_0)) * (e / E) \quad (2)$$

*** Quantité d'eau apportée**

- Soit W_F l'humidité finale du massif après la réhumectation.
- m_{e0} la masse d'eau initiale contenue dans la couche.
- m_e la masse d'eau apportée lors de la réhumectation.

$$W_F = (m_{e0} + m_e) / m_s' \quad (3)$$

$$W_0 = (m_{e0} / m_s) \quad (4)$$

De (3) et (4):

$$m_e = (m_s' * W_F) - (W_0 * m_s)$$

En employant les équations (1) et (2)

$$m_e = ((W_F / (1 + \Delta e/e)) - W_0) * (M_{sa} / (1 + W_0)) * e/E \quad (5)$$

* Calcul de $\Delta e/e$

Soit:

G l'indice de gonflement.

V1 le volume initial.

V2 le volume final.

$$G = (V2 - V1) / V1$$

Avec les hypothèses (2): le gonflement est isotrope.
et (3): il n'y a pas de fissuration.

On a:

$$G = (1 + \Delta e/e)^3 - 1$$

Ou

$$(1 + \Delta e/e) = (G + 1)^{1/3}$$

De (5) et (6) on en déduit:

$$m_e = ((W_F / (G + 1)^{1/3}) - W_0) * (M_{sa} / (1 + W_0)) * (e/E)$$